

**Ministère de l'Éducation et de la Science de l'Ukraine**  
**Université Nationale de Génie Urbain O. M. Beketov de Kharkiv**

**ÉLECTROTECHNIQUE**  
**EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION**  
**MANUEL**

Traduit de l'ukrainien de la 2e édition, corrigée et complétée

Sous la rédaction de V. M. Okhrimenko

**Kharkiv**  
**UNGU O. M. Beketov de Kharkiv**  
**2017**

УДК [621.3:69](075.8)  
E50

**Auteurs :**

**Anatolii Yegorovych Achkasov**, docteur es sciences économiques, professeur ;  
**Volodymyr Andriiovych Lushkin**, docteur es sciences économiques, professeur,  
ingénieur honoré de pouvoir de l'Ukraine et de l'UMP, l'académicien de  
l'Académie Internationale de l'Ingénierie, de l'Académie des Sciences  
d'Ingénierie de l'Ukraine ;  
**Viacheslav Mykolaiovich Okhrimenko**, candidat es sciences techniques, dotsent ;  
**Tetiana Borysivna Voronkova**, maître de conférences

**Révision du texte :**

**Yu. G. Kutsan**, docteur es sciences techniques, académicien de l'Académie des  
Sciences Techniques de l'Ukraine ;

**A. V. Prachovnik**, docteur es sciences techniques, professeur, directeur de l'Institut de  
l'Énergie et de la Gestion de l'Énergie l'Université Nationale Technique de l'Ukraine « KPI » ;

**A. I. Yakovlev**, docteur es sciences techniques, professeur, professeur département des  
centrales des appareils spatiales de l'Université Nationale aérospatiale M. E. Joukovsky  
« Institut d'aviation de Kharkiv », inventeur honoré de l'Ukraine, académicien de l'académie  
des sciences d'école supérieure de l'Ukraine

*Recommandé pour l'édition par le conseil Scientifique de Universite Nationale  
de Génie Urbain O. M. Beketov de Kharkiv, protocole №13 du 2 juin 2017*

**Le texte est imprimé par l'édition :**

**Електротехніка у будівництві**: підручник / [А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін,  
В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова] ; за ред. В. М. Охріменка ; Харків. нац. ун-т міськ.  
госп-ва ім. О. М. Бекетова. – 2-ге вид., випр. і доп. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,  
2015. – 447 с.

Traduit de l'ukrainien par V. M. Okhrimenko.

**L'électrotechnique en génie de la construction** : manuel / [A. Y. Achkasov,  
E50 V. A. Lushkin, V. M. Okhrimenko, T. B. Voronkova] ; red. V. M. Okhrimenko ; trad.  
de l'ukr. V. M. Okhrimenko ; Université Nationale de Génie Urbain O. M. Beketov  
de Kharkiv. – 2-e éd. corr. et comp. – Kharkiv : UNGU O. M. Beketov de Kharkiv,  
2017. – 460 p.

ISBN 978-966-695-437-7

On amène les informations principales de la théorie des circuits électriques, des  
transformateurs et des voitures électriques, la base de l'électronique et d'entraînement  
électrique d'amener. On décrit le matériel électrique des chantiers, des entreprises de  
l'industrie de construction, des systèmes de génie des bâtiments.

Le manuel est destiné aux étudiants des Universités, aux enseignants et aux  
lecteurs qui s'intéressent aux questions de fonctionnement de l'équipement électrique.

**УДК [621.3:69](075.8)**

Наводяться основні відомості з теорії електричних кіл, трансформаторів, електричних  
машин, основ електроніки й електропривода. Описано електрообладнання будівельних майдан-  
чиків, підприємств будівельної індустрії, інженерних систем будівель. Теми включають конт-  
рольні питання для закріплення матеріалу. Наведені задачі практичного змісту з прикладами  
їхнього розв'язання.

Підручник розрахований на студентів, викладачів та читачів, які цікавляться питаннями  
експлуатації електротехнічного обладнання.

© A. Y. Achkasov, V. A. Lushkin, V. M. Okhrimenko,  
T. B. Voronkova, 2017

ISBN 978-966-695-437-7

© UNGU O. M. Beketov de Kharkiv, 2017

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>8</b>
<b>Première parti : CIRCUITS ÉLECTRIQUES DE COURANT CONTINU</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 1 : Termes et notions de base.....</b>	<b>9</b>
1.1 Circuit électrique et ses éléments .....	9
1.2 Classification des courants électriques, de la F.E.M. et des tensions .....	10
1.3 Eléments des circuits électriques et leurs représentations graphiques ..	11
1.4 Directions positives des courants, de la F.E.M et des tensions .....	17
1.5 Règles générales d'exécution des schémas électriques .....	18
<b>Chapitre 2 : Processus physiques dans les circuits à courant continu .....</b>	<b>21</b>
2.1 Loi d'Ohm .....	21
2.2 Modes de fonctionnement de la source de courant continu .....	22
2.3 Loi d'Ohm généralisée pour la section active du circuit électrique .....	25
2.4 Travail et puissance à courant continu .....	27
2.5 Conditions de délivrance de la puissance maximale par une source.....	30
2.6 Schémas de connexions des éléments du circuit électrique .....	32
2.7 Lois de Kirchhoff .....	40
<b>Chapitre 3 : Méthodes de calcul des circuits complexes à courant continu ..</b>	<b>46</b>
3.1 Application des lois de Kirchhoff pour l'analyse des chaînes complexes	46
3.2 Méthode nodale .....	48
3.3 Méthode des courants de maille.....	50
3.4 Principe de superposition .....	52
3.5 Principe de la réciprocité .....	53
3.6 Méthode du générateur équivalent .....	55
<b>Dixième parti : CIRCUITS ÉLECTRIQUES À COURANT ALTERNATIF .....</b>	<b>60</b>
<b>Chapitre 4 : Processus physiques en courant alternatif .....</b>	<b>60</b>
4.1 Informations de base sur le courant alternatif .....	60
4.2 Éléments du schéma de substitution avec les courants variables .....	61
4.3 Valeurs efficaces et moyennes des tensions et des courants périodiques	65
4.4 Représentation des tensions et des courants sinusoïdaux en système de coordonnées cartésien .....	66
4.5 Représentation des tensions et des courants sinusoïdaux sous la forme complexe.....	70
4.6 Valeurs effectives et moyennes des tensions et des courants sinusoïdaux.	72
4.7 Forme complexe de la notation des lois de Kirchhoff .....	73
<b>Chapitre 5 : Circuits électriques à courant alternatif monophasé .....</b>	<b>77</b>
5.1 Circuit électrique avec un élément résistif .....	77
5.2 Circuit électrique avec une bobine parfaite .....	80
5.3 Circuit électrique avec un condensateur parfait .....	83

5.4 Circuit électrique avec une bobine réelle .....	85
5.5 Puissance de la bobine d'induction .....	88
5.6 Connexion en série d'une résistance et d'un condensateur parfait .....	91
5.7 Connexion en série d'une bobine d'induction et d'un condensateur .....	94
5.8 Circuits de courant alternatif aux récepteurs connectés en parallèle .....	96
5.9 Composantes actives et réactives d'une admittance et du courant .....	98
5.10 Amélioration du facteur de puissance dans les circuits de courant alternatif .....	101
<b>Chapitre 6 : Circuits électriques triphasé .....</b>	<b>106</b>
6.1 Termes et notions de base .....	106
6.2 Schémas de connexion des enroulements de l'alternateur triphasé .....	108
6.3 Couplage des consommateurs triphasés en étoile .....	109
6.4 Couplage des consommateurs triphasés en triangle .....	111
6.5 Réseaux électriques triphasés à quatre fils .....	113
6.6 Puissance active, réactive et apparente du réseau électrique triphasé .....	116
6.7 Comparaison des conditions de fonctionnement du récepteur lors de la connexion de ses phases en triangle et en étoile .....	117
<b>Troisième partie : MESURES ÉLECTRIQUES .....</b>	<b>119</b>
<b>Chapitre 7 : Appareils de mesure électriques .....</b>	<b>119</b>
7.1 Termes de base .....	119
7.2 Classification des appareils de mesure électrique .....	121
7.3 Caractéristiques techniques générales des appareils de mesure électriques .....	122
7.4 Appareil magnéto-électrique .....	123
7.5 Appareils électromagnétiques .....	125
7.6 Appareils électrodynamiques et ferrodynamiques .....	127
7.7 Convertisseurs de mesure.....	128
7.8 Appareils de mesure analogiques .....	133
7.9 Appareils de mesure numériques.....	134
<b>Chapitre 8 : Méthodes de mesures électriques .....</b>	<b>137</b>
8.1 Erreurs de mesure .....	137
8.2 Classification des méthodes de mesures électriques .....	140
8.3 Schémas de mesure .....	141
8.4 Mesure du courant et de la tension .....	145
8.5 Mesure de la puissance et de l'énergie électrique .....	149
8.6 Mesure des valeurs non électriques .....	154
<b>Quatrième partie : TRANSFORMATEURS ET MACHINES ÉLECTRIQUES.....</b>	<b>158</b>
<b>Chapitre 9 : Transformateurs .....</b>	<b>161</b>
9.1 Informations de base sur les transformateurs .....	161
9.2 Transformateur monophasé .....	162
9.3 Paramètres de passeport et caractéristique extérieure du transformateur ..	166
9.4 Transformateurs triphasés.....	169



9.5 Autotransformateurs .....	170
9.6 Transformateurs de mesure .....	172
<b>Chapitre 10 : Machines électriques à courant continu .....</b>	<b>174</b>
10.1 Constitution de la machine à courant continu .....	174
10.2 Principe de fonctionnement d'une génératrice à courant continu ....	177
10.3 Réaction d'induit .....	178
10.4 Commutation dans les machines à courant continu .....	180
10.5 Pertes d'énergie et rendement.....	182
10.6 Schémas de connexions des bobinages d'excitation .....	183
10.7 Paramètres nominaux et caractéristiques des MCC .....	184
10.8 Génératrices à courant continu .....	185
10.9 Moteurs à courant continu .....	190
<b>Chapitre 11 : Machines électriques asynchrones .....</b>	<b>201</b>
11.1 Construction et principes de fonctionnement d'une machine asynchrone triphasée .....	201
11.2 F.é.m. du stator et du rotor.....	205
11.3 Equations de l'équilibre électrique du stator et du rotor .....	207
11.4 Equations des forces magnétisante et des courants .....	209
11.5 Schéma équivalent d'une machine asynchrone .....	211
11.6 Pertes et rendement du moteur asynchrone .....	212
11.7 Couple de la machine asynchrone .....	214
11.8 Caractéristiques de fonctionnement des moteurs asynchrones .....	217
11.9 Démarrage des moteurs asynchrones .....	219
11.10 Caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone dans les modes de freinage .....	222
11.11 Moteur asynchrone monophasé .....	224
<b>Chapitre 12 : Machines synchrones .....</b>	<b>229</b>
12.1 Constitution des machines synchrones .....	229
12.2 Génératrice synchrone .....	231
12.3 Caractéristiques extérieures du générateur synchrone .....	233
12.4 Couple électromagnétique du générateur synchrone .....	234
12.5 Fonctionnement de la MS en parallèle avec le réseau .....	236
12.6 Moteur synchrone .....	239
12.7 Démarrage des moteurs synchrones .....	241
12.8 Réglage du facteur de puissance des moteurs synchrones .....	242
12.9 Caractéristiques de fonctionnement des moteurs synchrones .....	244
12.10 Comparaison des moteurs synchrones et asynchrones .....	245
<b>Cinquième partie : ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE ET ANTRAÎNEMENT ÉLECTRIQUE .....</b>	<b>248</b>
<b>Chapitre 13 : Bases de l'électronique industrielle .....</b>	<b>248</b>
13.1 Éléments de la technique de semi-conducteurs .....	249
13.2 Redresseurs à semi-conducteurs .....	259
13.3 Filtres de la tension redressée .....	277

13.4 Amplificateurs .....	279
<b>Chapitre 14 : Commande des machines électriques .....</b>	<b>284</b>
14.1 Informations générales .....	284
14.2 Mécanique d'entraînement électrique .....	286
14.3 Équation du mouvement d'entraînement électrique.....	290
14.4 Caractéristiques mécaniques des mécanismes industriel et des moteurs électriques .....	292
14.5 Choix du moteur électrique .....	296
<b>Chapitre 15 : Régulation de vitesse d'entraînement électrique .....</b>	<b>303</b>
15.1 Paramètres principaux de la régulation de vitesse angulaire d'entraînement électrique .....	303
15.2 Régulation de vitesse angulaire du moteur à courant continu à l'excitation indépendante .....	305
15.3 Régulation de vitesse angulaire des moteurs asynchrones .....	311
<b>Sixième partie : INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DES CHANTIERS, DES ENTREPRISES ET DES BATIMENTS.....</b>	<b>318</b>
<b>Chapitre 16 : Installations électrique des équipements de soudage .....</b>	<b>318</b>
16.1 Procédés de soudage électrique .....	318
16.2 Exigences principales aux sources d'alimentation de l'arc de soudage .....	319
16.3 Convertisseurs de soudage à courant continu .....	320
16.4 Postes de soudage à courant alternatif .....	323
16.5 Installations de soudage par contacts .....	326
<b>Chapitre 17 : Installations électrique des équipements de levage et de transport .....</b>	<b>328</b>
17.1 Généralités sur le matériel de levage et de transport .....	328
17.2 Electromoteurs du matériel de levage et de transport .....	329
17.3 Éléments d'équipement de la gestion .....	332
17.4 Entraînement électrique des grues de chantier .....	345
<b>Chapitre 18 : Outils électriques à main .....</b>	<b>351</b>
18.1 Informations de base .....	351
18.2 Isolation des outils électriques à main .....	352
18.3 Exemples de constitutions d'outils électriques à main .....	353
18.4 Exploitation et réparation d'outils électriques à main .....	357
<b>Chapitre 19 : Rechauffage électrique du béton et du sol.....</b>	<b>360</b>
19.1 Rechauffage électrique du béton .....	360
19.2 Rechauffage électrique du sol .....	364
19.3 Sécurité du travail au rechauffage électrique .....	367
<b>Chapitre 20 : Installations d'éclairage .....</b>	<b>368</b>
20.1 Informations de base .....	368
20.2 Sources de lumière et armature d'éclairage .....	369
20.3 Installations d'éclairage .....	372

20.4 Calcule simplifié des installations d'éclairage .....	374
<b>Chapitre 21 : Installations électrique des bâtiments .....</b>	<b>378</b>
21.1 Informations générales .....	378
21.2 Systèmes de ventilation et d'air conditionné .....	379
21.3 Ascenseurs et escaliers mécaniques.....	380
21.4 Éléments des systèmes de l'approvisionnement en eau .....	382
21.5 Chauffage électrrique .....	384
<b>Chapitre 22 : Sécurité électriques en génie de la construction .....</b>	<b>387</b>
22.1 Informations générales .....	387
22.2 Action du courant électrique sur l'organisme humain .....	387
22.3 Classification des conditions des travaux par degré de sécurité électrique .....	389
22.4 Sécurité des travaux sur les installations électriques .....	390
22.5 Mise à la terre et mise au neutre .....	392
<b>Septième partie : Problèmes et exemples de leur solution .....</b>	<b>397</b>
<b>Chapitre 23 :Cicruits électriques de courant continu .....</b>	<b>397</b>
<b>Chapitre 24 : Circuits électriques à courant alternatif monophasé .....</b>	<b>407</b>
<b>Chapitre 25 : Circuits électriques triphasé .....</b>	<b>417</b>
<b>Chapitre 26 : Mesures électriques .....</b>	<b>422</b>
<b>Chapitre 27 : Transformateurs .....</b>	<b>425</b>
<b>Chapitre 28 : Machines à courant continu .....</b>	<b>429</b>
<b>Chapitre 29 : Machines asynchrones .....</b>	<b>431</b>
<b>Chapitre 30 : Entraînement électrique .....</b>	<b>435</b>
<b>LISTE D'ABREVIATIONS ET D'INDICES .....</b>	<b>440</b>
<b>TABLE ANALYTIQUE .....</b>	<b>442</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>446</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>451</b>

## INTRODUCTION

La production moderne de l'industrie de la construction se distingue par une large application des divers équipements de mécanisation et d'automatisation des processus de fabrication. Les grues de chantier, les treuils, les ascenseurs, les soudeuses, les installations d'éclairage et d'autres équipements sont caractérisés par l'utilisation de l'énergie électrique pour la réalisation de sa destination fonctionnelle. La part de l'équipement électrotechnique au nombre des systèmes de génie des bâtiments modernes s'élargit constamment. Dans ces conditions l'ingénieur en bâtiment doit comprendre la physique du travail de l'équipement électrotechnique, ses caractéristiques, la particularité de l'utilisation, les critères du choix et les normes de l'exploitation sûre.

Les programmes de formation en génie de la construction prévoient d'apprentissage de la discipline « l'Électrotechnique », dont une partie des thèmes sont examinés traditionnellement dans quelques disciplines des spécialités électrotechniques. Ce sont les questions de la théorie des circuits électriques, des machines électriques, l'électronique, l'entraînement électrique. Les questions du matériel électrique des chantiers, des systèmes de génie des bâtiments et des entreprises de l'industrie de la construction sont éclairés seulement dans la littérature spéciale.

L'édition du manuel donné a pour le but de concentrer dans une source l'information sur tous les thèmes de la discipline « l'Électrotechnique en génie de la construction ». Le contenu du livre et la méthodologie de présentation sont dirigés en premier lieu sur les étudiants des spécialités de construction. Le livre est aussi compté sur les travailleurs techniques, qui ne sont pas les spécialistes dans le domaine de l'électrotechnique, mais décident pratiquement les tâches de l'application et l'exploitation du matériel électrique et souhaitent recevoir la représentation sur les principes de base de son travail. En outre la plupart des thèmes du livre peuvent être utiles aux étudiants des spécialités techniques des établissements d'enseignement à l'étude des disciplines, dont les programmes contiennent les questions de l'électrotechnique, des voitures électriques et de l'électronique.

La partie pratique du manuel est présentée par les problèmes avec les exemples de leur décision et les variantes des données initiales pour la décision indépendante.

L'édition donnée du manuel est préparée par les auteurs :

- Achkasov A. Y. – chapitres 9, 17, 18, 22, sixième partie ;
- Loushkin V. A – chapitres 1, 7, 12, 19, 20, sixième partie ;
- Okhrimenko V. M – chapitres 3, 5, 6, 11, 13, 16, 21, la rédaction générale ;
- Voronkova T. B. – chapitres 2, 4, 7, 8, 10, 14, 15.

Les auteurs expriment la reconnaissance sincère aux critiques, au docteur es sciences techniques, académicien de l'AST de l'Ukraine J. G. Koutsan, au docteur es sciences techniques, professeur, directeur de l'Institut de l'Énergie et de la Gestion de l'Énergie l'Université Nationale Technique de l'Ukraine « KPI » A. V. Prakhovnik à l'inventeur honoré de l'Ukraine, docteur es sciences techniques, professeur département des centrales des appareils spatiaux de l'Université Nationale aérospatiale M. E. Joukovsky « Institut d'aviation de Kharkiv », académicien de l'Académie des Sciences d'École Supérieure de l'Ukraine A. I. Yakovlev pour les remarques utiles et les conseils en ce qui concerne le contenu et la méthode de l'exposition de ce didacticiel.

## Première partie : CIRCUITS ÉLECTRIQUES DE COURANT CONTINU

Les premières installations électrotechniques fonctionnaient en courant continu. Pourtant, l'inconvénient essentiel de l'énergie électrique à courant continu, notamment la complexité de transport sur de longues distances, se manifestait de plus en plus à mesure de l'augmentation des besoins en énergie électrique.

La production moderne, le transport, la distribution et la consommation de l'énergie électrique se réalisent essentiellement au moyen des installations à courant alternatif. Une large application de ce courant était favorisée par la possibilité du transport économique des grandes quantités d'énergie électrique des lieux de sa production (centrales électriques) aux pôles de sa consommation (aux électrorécepteurs). Un important facteur a été aussi la simplicité comparative et l'efficacité économique des générateurs, des moteurs et d'autres installations à courant alternatif.

Cependant, malgré la position dominante du courant alternatif dans la vie moderne, certains consommateurs ont besoin du courant continu. Ce sont les consommateurs, dont les installations ne peuvent pas fonctionner en courant alternatif (par exemple, électrochimiques). Dans plusieurs branches de la technique, les installations à courant continu assurent de plus hauts paramètres technologiques que les installations à courant alternatif.

Les installations à courant continu sont utilisées largement aussi sur les chantiers et les entreprises de l'industrie de construction, dans le transport, dans le matériel électrique des navires, des installations spatiales, des avions, des automobiles, dans les systèmes de l'automatique et les équipements informatiques.

### Chapitre 1 : TERMES ET NOTIONS DE BASE

**Notions clés :** circuit,  $m$  ; tronçon de circuit,  $m$  ; sources,  $f pl$  ; consommateurs,  $m pl$  ; courant électrique,  $m$  (continu, alternatif) ; force électromotrice,  $f$  ; tension,  $f$  ; élément,  $m$  (linéaire ; non-linéaire) ; circuit,  $m$  (ramifié, non ramifié) ; résistance,  $f$  ; inductance,  $f$  (mutuelle) ; capacité,  $f$  ; élément,  $m$  (actif, passif) ; schéma,  $m$  (de connexions de la chaîne, de substitution) ; bipôle,  $m$  (actif, passif) ; couplage série,  $m$  ; boucle,  $m$  ; nœud,  $m$  ; branche,  $f$ .

#### 1.1 Circuit électrique et ses éléments

**Circuit électrique** est un ensemble de dispositifs destinés à la production, le transport, la conversion et l'utilisation de l'énergie électrique. Les dispositifs, composant un circuit électrique, se sont appelés **éléments de circuit électrique**. Une partie de circuit électrique dont les composants sont déterminés on appelle **branche de circuit**.

Les éléments du circuit, destinés à générer de l'énergie électrique, on appelle **sources d'alimentation** ou **sources d'énergie électrique**, tandis que les éléments qui utilisent de l'énergie électrique sont des **récepteurs d'énergie électrique**.

Dans les sources on obtient l'énergie électrique par conversion à partir d'autres formes d'énergie : mécanique, chimique, thermique, lumineuse, etc.

Dans les récepteurs, au contraire, l'énergie électrique est convertie en d'autres formes d'énergie notamment mécanique dans les moteurs électriques, chimique dans les accumulateurs, thermique dans les différents réchauds et fours, lumineuse dans l'éclairage, etc.

Pour la transmission d'énergie électrique à partir de sources aux consommateurs sont utilisés tels éléments comme : réseaux électriques, fils et câbles, instruments de contrôle et de gestion, appareils de conversion (transformateurs, redresseurs et d'autres). Ces éléments de la chaîne transforment l'énergie électrique dans un état dans lequel il est plus facile de la transmettre sur les distances et de la distribuer entre les récepteurs.

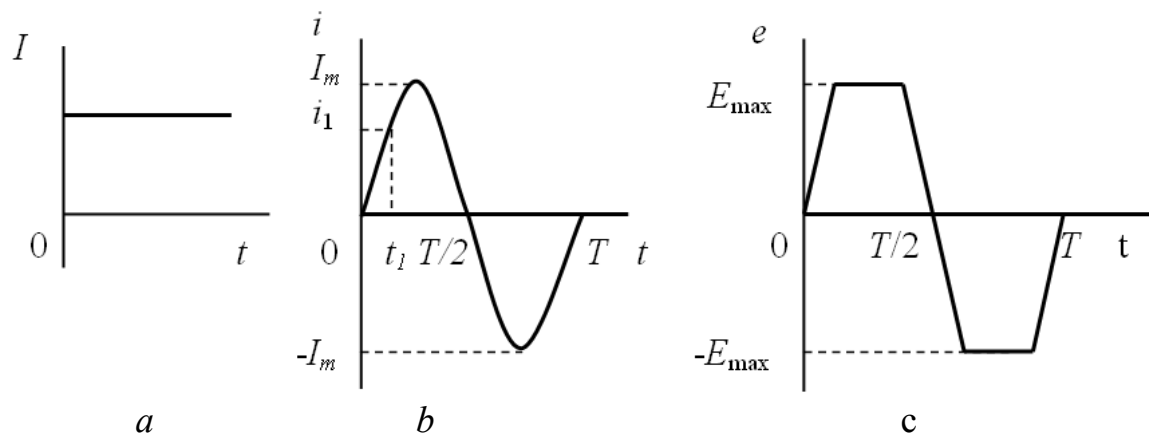
## 1.2 Classification des courants électriques, de la f.é.m. et des tensions

Lorsque un circuit électrique est fermé et dispose d'une source d'énergie électrique il y a un mouvement ordonné des porteurs de charges électriques, autrement dit, **le courant électrique**.

La valeur ou l'intensité du courant électrique dépend de la quantité d'électricité (charge électrique), traversant une section d'un conducteur en une unité de temps.

Le courant électrique, dont l'intensité et le sens restent invariables, on appelle **courant continu** (fig. 1.1, a) et on l'indique par la lettre majuscule  $I$ . Si un débit de charge en  $q$  coulombs est passé en  $t$  secondes, l'intensité du courant est égale :

$$I = q/t. \quad (1.1)$$



**Figure 1.1** – Différentes formes des courbes de courant :  
a – continu ; b et c – périodique

Ainsi la charge qui transporte le courant continu  $I$  en un temps  $t$  est égale

$$q = I \cdot t \quad (1.2)$$

Le courant électrique, dont l'intensité ou le sens ne sont pas constants, est appelé **courant alternatif**. La valeur de variation du courant à un moment donné est appelée la **valeur instantanée** et elle est marquée par la lettre minuscule  $i$ . Le courant  $i$  est associé avec la charge  $q$  et le temps  $t$  par l'équation

$$i = dq/dt. \quad (1.3)$$

Sur un intervalle de temps de 0 à  $t$  le courant variable transfère une charge

$$q = \int_0^t i \cdot dt. \quad (1.4)$$

L'unité de l'intensité du courant est l'ampère (symbole A), une unité électrique de base dans le Système International d'unités (SI). La charge dans ce système est mesurée en Ampères-secondes (A.s), ou en Coulombs (C). La charge en 1 C correspond à la charge de  $6,24 \cdot 10^{18}$  électrons. Avec le courant de 1 A la charge traversant une section d'un conducteur en 1 seconde est égale à  $6,24 \cdot 10^{18}$  électrons.

Les formes des courbes de l'évolution des courants sont très variés. La plus grande importance parmi eux ont des courants périodiques. Un courant périodique c'est un tel courant dont les valeurs instantanées se reproduisent à des périodes régulières dans le temps. La plus petite partie de temps où la valeur instantanée du courant se répète est appelée période et est notée  $T$ . Le nombre de périodes en une seconde est appelé **fréquence du courant périodique**. La fréquence est mesurée en Hertz (Hz) et est désignée par la lettre  $f$ . La fréquence et la période sont liées par l'équation

$$f = 1/T. \quad (1.5)$$

Le courant qui change d'après la loi harmonique est appelé **courant sinusoïdal** (voir la figure 1.1, *b*). Il est d'usage d'appeler un courant sinusoïdal en fréquence industrielle de 50 Hz le **courant alternatif**, bien que dans la théorie des circuits on entende sous le courant alternatif tout courant variable.

Si la loi de modification des valeurs instantanées du courant (de la tension) périodique diffère de la loi harmonique alors ce courant (tension) est appelé **non sinusoïdal** (voir la figure 1.1, *c*).

La plus grande valeur du courant sinusoïdal est appelée **amplitude** et est notée par la lettre majuscule  $I$  avec un indice  $m$  ( $I_m$ ). La plus grande valeur du courant non sinusoïdal est indiquée par la lettre minuscule  $i$  avec un indice max ( $i_{\max}$ ).

Les courants continus ou alternatifs se produisent dans les circuits électriques sous l'action des **forces électromotrices** (F.E.M., ou on écrit encore f.é.m.), engendrées dans des sources au cours du processus de conversion d'une forme d'énergie en énergie électrique. La f.é.m. et la tension (par analogie avec les courants) selon la loi de la modification de leurs valeurs instantanées sont appelées continues, alternatives, sinusoïdales et non sinusoïdales. La f.é.m. et la tension continue sont notées par les majuscules  $E$  et  $U$ , et la f.é.m. et la tension variable sont désignées par les minuscules,  $e$  et  $u$ . L'unité de mesure de la f.é.m. et de la tension est le volt (V).

L'ensemble des grandeurs caractérisant l'action de la f.é.m. sur un circuit et les tensions et courants résultant de cette action déterminent le **mode de fonctionnement** du circuit électrique et de ses éléments.

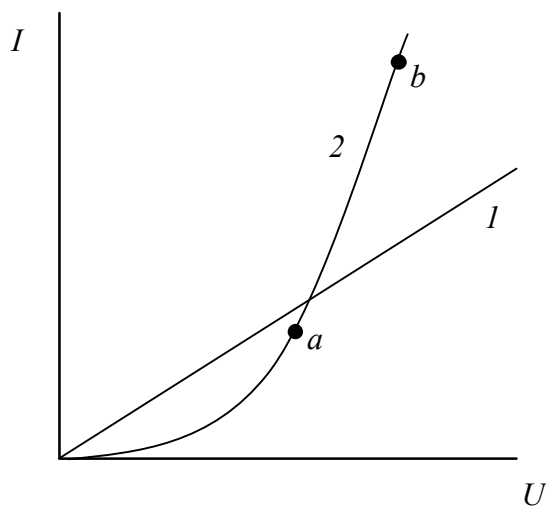
### 1.3 Éléments des circuits électriques et leurs représentations graphiques

En fonction du caractère de courant dans un circuit électrique, on appelle celui-ci respectivement « **circuit électrique en courant continu** », « **circuit**

**électrique en courant alternatif**». Dans certains cas on précise et on dit : « **circuit électrique à courant sinusoïdal (non sinusoïdal)** ».

De même, on appelle et les éléments de circuits : « machine électrique à courant continu », « machine électrique à courant alternatif », « source de courant continu », « récepteur de courant alternatif », etc.

Les circuits électriques et ces éléments se subdivisent encore selon les caractéristiques exprimant, par exemple, la dépendance de leur courant de la tension appliquée  $I(U)$ , notamment, la caractéristique ampère-volts. Les exemples de ces caractéristiques sont représentés sur la figure 1.2. Les éléments des circuits, dont les caractéristiques sont linéaires, sont appelés les éléments linéaires. Les éléments non linéaires ont les caractéristiques non linéaires.



**Figure 1.2** – Caractéristiques des éléments de circuit : 1 – linéaire ; 2 – non-linéaire

Les circuits électriques se distinguent aussi par la méthode de connexion de leurs éléments, notamment, un **circuit ramifié** (ou branché) et **non ramifié**, selon le nombre des sources d'énergie électrique, c'est-à-dire, le circuit à un seul et à plusieurs sources d'énergie électrique. Il y a aussi d'autres noms de circuits.

Un circuit électrique composé d'éléments linéaires est appelé le circuit linéaire. Le circuit électrique, qui comprend au moins un élément non linéaire, est appelé le circuit non-linéaire.

Les calculs de modes des circuits non linéaires sont très compliqués et pour les simplifier on fait ses calculs sur les branches linéaires des caractéristiques des éléments non linéaires (zone a-b de la ligne 2 des caractéristiques sur la figure 1.2).

Les récepteurs d'énergie électrique, comme éléments d'un circuit électrique, ont des propriétés d'absorber de l'énergie électrique du circuit et de la convertir en d'autres formes d'énergie (processus irréversible), de créer leurs champs électriques et magnétiques. L'énergie de ces champs peut s'accumuler et à conditions déterminées revenir dans le circuit (un processus réversible). Pour caractériser ces propriétés, on introduit la notion de paramètre d'un élément. On distingue les paramètres suivants d'un élément du circuit : résistance, inductance et capacité.

**La résistance ( $R$ )** est le paramètre qui caractérise la propriété d'un élément d'absorber de l'énergie du circuit électrique et de la convertir en d'autres types d'énergie (thermique ou lumineuse). On sait que la puissance ( $P$ ,  $p$ ) de la conversion de l'énergie électrique est proportionnelle au carré du courant ( $I^2$ ,  $i^2$ ), donc la valeur de ce paramètre (la résistance) est déterminée par l'équation  $R = P/I^2$  pour le courant continu et  $R = p/i^2$  pour le courant alternatif. **L'unité de mesure de la résistance est l'ohm ( $\Omega$ ).**

Les propriétés d'un élément du circuit avec le courant électrique de générer son propre champ magnétique (le champ de l'inductance) sont caractérisés par le



paramètre de l'inductance  $L$ .  **$L$ 'inductance** est le coefficient de proportionnalité entre le courant ( $I, i$ ) et le flux embrassé ( $\psi, \psi_t$ ) de cet appareil:  $\psi = L \cdot I$  ou  $\psi = L \cdot i$ . Elle est appelée le coefficient d'inductance et est mesuré en henry (H).

Le paramètre l'**inductance mutuelle**  $M$  caractérise la propriété du premier élément avec le courant  $i_1$  de créer un champ magnétique s'embranchant partiellement avec les spires du deuxième élément. Le flux embrassé  $\psi_{21}$  du deuxième élément (premier indice) conditionné par le courant  $i_1$  du premier élément (deuxième indice) est appelé **flux d'induction mutuel** du deuxième élément. Le paramètre l'inductance mutuelle  $M$  est le coefficient de proportionnalité entre le courant du premier élément et le flux embrassé, créé par celui-ci en deuxième élément:  $\psi_{12} = M \cdot I_2$  ou  $\psi_{12t} = M \cdot i_2$ .

Une interaction similaire il y a entre le flux embrassé du premier élément créé par le courant du deuxième élément:  $\psi_{12} = M \cdot I_2$  ou  $\psi_{12t} = M \cdot i_2$ .

La **capacité** ( $C$ ) est un paramètre qui caractérise la propriété d'un élément d'accumuler les charges ou d'exciter leur champ électrique. Ce paramètre est un coefficient de proportionnalité entre la tension et la charge de l'élément :  $q = C \cdot U$ .

Dans le cas général tout appareil réel possède tous les trois paramètres  $R, L$  et  $C$ .

La propriété essentielle d'une source d'énergie électrique est la capacité de créer et de maintenir une différence de potentiel dans certaines branches du circuit ainsi que d'engendrer et maintenir un courant électrique dans un circuit fermé. Cette propriété est appelée **force électromotrice (f.é.m.)**. La valeur de la f.é.m. ( $e, E$ ) est égale à l'énergie qu'une charge positive de 1 C (*coulomb*) acquiert en parcourant la source d'énergie sous l'action des forces extérieures. Si la charge  $dq = i \cdot dt$  parcourt une source de courant alternatif en un temps  $dt$ , l'énergie développée par cette source est égale à  $dW = e \cdot dq = e \cdot i \cdot dt$  et la puissance instantanée  $p = dW/dt = e \cdot i$ . Pour une source de courant continu l'énergie et la puissance développées sont respectivement égales à  $W = E \cdot I \cdot t$  et  $P = E \cdot I$ .

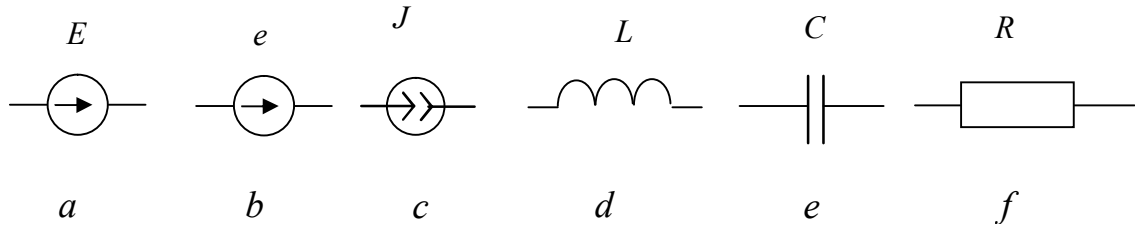
Le passage du courant électrique par une source s'accompagne des pertes d'énergie à l'intérieur de la source pour le chauffage. Ces pertes sont caractérisées par le paramètre de la **résistance**  $R$ . La résistance avec la f.é.m. sont, par conséquent, des paramètres essentiels de la source. Dans certains cas, on prend également en compte le paramètre de l'inductance  $L$  dans les sources de courant alternatif.

Les éléments des circuits électriques, dont le fonctionnement on peut décrire à l'aide des paramètres  $R, L, M$  et  $C$ , sont appelés passifs. Le terme « passif » souligne que ces éléments ne peuvent pas accomplir leur devoir sans couplage avec des sources d'énergie électrique.

Les éléments du circuit dont le fonctionnement exige, outre les paramètres passifs, une mise en œuvre de la f.é.m. ou du courant sont appelés **actifs**. Les éléments actifs sont toutes les sources d'énergie électrique et certains récepteurs dont la description des processus ne peut pas être limitée seulement par des paramètres passifs (une batterie lors de la charge, des moteurs à courant continu et d'autres).

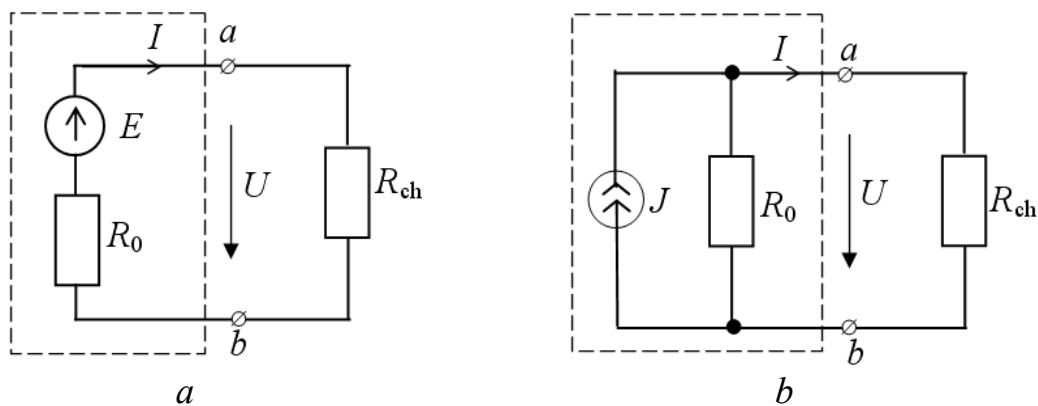
Les éléments du circuit qui n'ont qu'un seul paramètre sont appelés **parfaits (idéales)**. Une source parfaite de f.é.m. a seulement un paramètre de la valeur de f.é.m.  $E$  (fig. 1.3, *a*), une source parfaite de courant – seulement celui du courant  $J$  (fig. 1.3, *b*), un élément inductif parfait (bobine idéale d'induction)

celui d'inductance  $L$  (fig. 1.3,  $d$ ), un élément capacitif parfait (condensateur) – celui de capacité  $C$  (fig. 1.3,  $e$ ) et un élément résistif parfait – celui de résistance  $R$  (fig. 1.3,  $f$ ). En cas général, tout élément passif réel dispose de trois paramètres  $R, L, C$ .



**Figure 1.3** – Présentation graphique des éléments idéales :  
 $a$  – source de f.é.m. à courant continu ;  $b$  – source de f.é.m.  
ou de la tension alternatif ;  $c$  – source de courant ;  
 $d$  – inductance ;  $e$  – capacité ;  $f$  – résistance

Les sources d'énergie électrique se subdivisent en sources de f.é.m. et sources de courant dont les schémas équivalents sont illustrés par la figure 1.4. Propriétés de la source d'énergie électrique sont déterminées par sa caractéristique volts-ampérage (externe) c'est-à-dire par la dépendance de la tension de sortie du courant  $U(I)$ .

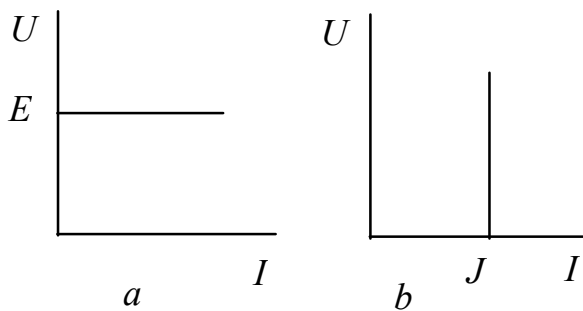


**Figure 1.4** – Schémas de substitution de source de f.é.m. ( $a$ ) et du courant ( $b$ )

Si dans un schéma du circuit la valeur de la résistance interne de la source d'énergie électrique  $R_0$  est petite par rapport à la résistance de charge  $R_{ch}$ , l'inégalité  $R_0 \cdot I \ll E$  est juste. Dans ce cas, la tension entre les bornes de la source d'énergie électrique est presque indépendant du courant, c'est-à-dire  $U = E = \text{const}$ , et la source est appelée **source de f.é.m.**

On peut remplacer une source à faible résistance interne par un modèle idéalisé dont  $R_0 = 0$ . Une telle source est appelée **source de f.é.m. parfaite** avec un seul paramètre  $E = U$ . La tension aux bornes de sortie de la source de f.é.m. parfaite dépend du courant, et sa caractéristique externe est représentée par la ligne droite  $U = E = \text{const}$  (fig. 1.5,  $a$ ).

Si dans le schéma du circuit la résistance interne de la source d'énergie électrique est beaucoup plus grande que la résistance de charge ( $R_0 \gg R_{ch}$ ), le courant  $I = E / (R_0 + R_{ch}) \approx E / R_0 = J = \text{const}$  ne dépend pas de la résistance de charge et la source est appelée **source de courant**.

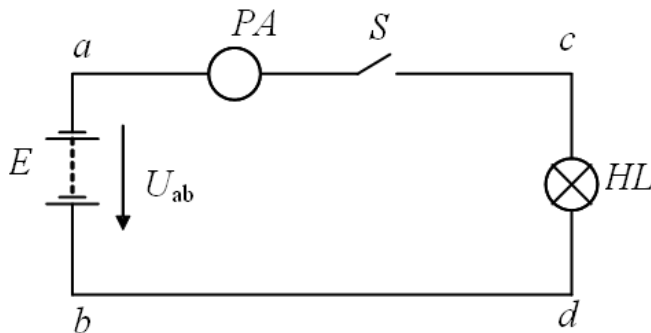


**Figure 1.5** – Caractéristiques externes :  
 a – d’une source de la f.é.m.parfaite ;  
 b – d’une source du courant parfaite

On peut remplacer la source à grande résistance interne par un modèle dont  $R_0 = \infty$  et  $E = \infty$  et pour lequel l’expression  $E/R_0 = J$  est juste. Une telle source on appelle **source de courant parfaite**. Elle a le seul paramètre  $J$ . Le courant à la sortie de la source ne dépend pas de la tension et sa caractéristique externe est représentée par une ligne droite  $I = J = \text{const}$  (fig. 1.5, b).

La représentation graphique d’un circuit électrique à l’aide des symboles de ses éléments est appelé **schéma du circuit**. Les schémas permettent d’obtenir une représentation visuelle de la structure du circuit électrique, de l’ordre de connexion de ses éléments.

La figure 1.6 à titre d’exemple présente le schéma d’un circuit électrique simple à courant continu, qui se compose d’une source (une batterie)  $E$  avec une résistance interne  $R_0 \ll R_{ch}$ , d’un ampèremètre  $PA$ , d’un interrupteur  $S$  et d’un récepteur (l’ampoule  $HL$ ).



**Figure 1.6** – Schéma d’un circuit électrique simple

L’étude des propriétés électriques des circuits électriques et de ses éléments en prenant en considération tous leurs paramètres est très difficile et, pour simplifier l’analyse, on représente un circuit réel par son modèle, c’est-à-dire par un ensemble d’éléments parfaits.

La représentation graphique d’un circuit électrique à l’aide des éléments parfaits dont les paramètres sont ceux d’éléments remplaçables on appelle **schéma de substitution du circuit électrique**.

On intègre des éléments parfaits dans un schéma de substitution afin de prendre en considération les phénomènes qui caractérisent leurs paramètres et produisent un effet significatif sur les processus physiques dans le circuit. On ne prend pas en compte les paramètres des éléments réels qui ne feront aucune action significative sur les processus physiques. Par exemple, on introduit un élément résistif dans le schéma de substitution pour prendre en considération un processus irréversible d’absorption de l’énergie par un élément du circuit. On introduit les éléments inductifs et capacitifs dans le schéma de substitution dans le cas où on veut prendre en compte l’influence des champs.

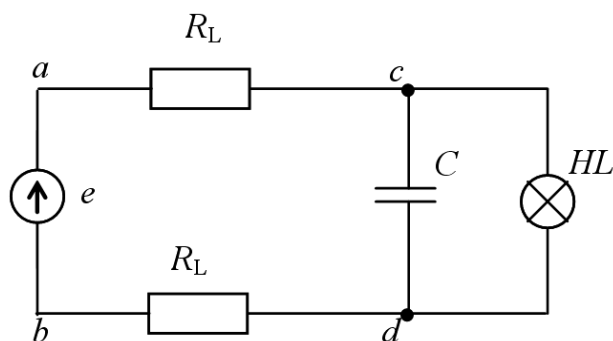
Un même élément de circuit peut être représenté par différents schémas de substitution en fonction des objectifs de ce schéma. Par exemple, dans un circuit à courant continu, la bobine d’induction est représentée dans le schéma de substitution par un seul élément résistif pour le calcul de sa chauffe. Mais lors de

l'étude des processus physiques dans la bobine à courant alternatif, on présente celle-là comme les éléments parfaits résistif et inductif connectés en série. Et en cas d'examen du fonctionnement de la bobine dans des circuits à haute fréquence, on compose un schéma de substitution comprenant des éléments résistif, inductif et capacitif.

Lors de l'élaboration de la documentation de conception de matériel électrique on applique des schémas électriques qui contrairement aux schémas de substitution sont effectuées en stricte conformité avec les normes en vigueur, par exemple, les normes du SUDC (Système Unifié de la Documentation de Conception). Lors de l'élaboration de normes des règles pour la traitement graphique de documents on prend en considération les recommandations des organisations internationales, à savoir : l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation), la CEI (Commission Électrotechnique Internationale) et d'autres. On distingue des schémas électriques de principe, structurels, fonctionnels, de montage.

À titre d'exemple, la figure 1.7 illustre le schéma d'un circuit de courant alternatif, composé d'une source de F.E.M alternative, deux résistances actives  $R_L$ , condensateur  $C$ , lampe d'éclairage  $HL$ . Servons-nous de ce schéma pour observer les noms des parties séparées et de l'ensemble de la chaîne.

La source d'alimentation constitue *le tronçon interne de circuit*, et les récepteurs avec les fils présentent *le tronçon extérieur de circuit* ou tout simplement *le circuit externe*. Les bornes (les pôles) de la source  $a$  et  $b$  reliées avec le circuit externe on appelle **bornes (les pôles) de départ de la source**.



**Figure 1.7** – Schéma d'un circuit de courant alternatif

Les bornes  $a$  et  $b$  sont simultanément les **bornes d'entrée** de la chaîne extérieure. Dans certains cas la chaîne extérieure est divisée en deux tronçons caractéristiques: la ligne de transmission (fils communicateurs) et le consommateur de l'énergie électrique (l'électrorécepteur).

Sur la figure 1.7 bornes  $a-c$  et  $b-d$  forment la ligne de transmission avec la résistance  $2R_L$ , le borne  $c-d$  (le condensateur  $C$  et la lampe de l'incandescence  $HL$ ) forme l'électrorécepteur. Dans ce cas les bornes  $c-d$  sont des bornes d'entrée de l'électrorécepteur.

Les bornes de la chaîne extérieure connectées aux fils partant de la source, sont nommées **bornes (pôles) d'entrée** de la chaîne extérieure. La partie de la chaîne ayant deux pôles est nommée **dipôle**. On distingue les **dipôles actifs** (ils contiennent les sources) et les **dipôles passifs** (qui ne contiennent pas les sources).

La connexion des éléments du réseau, à qui le même courant passe par tous les tronçons, appellent **couplage série**. N'importe quelle voie fermée passant par quelques tronçons, appellent le **boucle de la chaîne électrique**. La chaîne, le schéma de laquelle est montrée sur la figure 1.6, est la chaîne d'un contour dont les éléments sont couplé en série.

Le tronçon de la chaîne, le long duquel à n'importe quel moment du temps le courant a la même signification, appellent la **branche**, et le point de la liaison de trois ou de plus grand nombre des branches – le **noeud**.

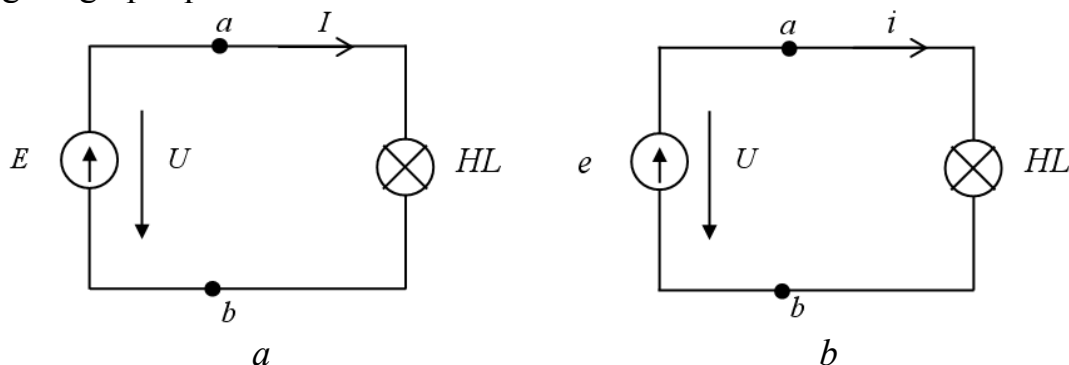
Le couplage, dont deux ou plus de branches sont connecté à une paire de noeuds, appellent **couplage en dérivation**. Le schéma (fig. 1.7) a deux noeuds  $c$  et  $d$ , à qui on connecte deux récepteurs (la lampe et le condensateur), joint parallèlement. Les tronçons parallèles se trouvent sous la même tension. La chaîne électrique aux branches parallèles et branches séries on appellent **circuit ramifié**. Le circuit ramifié a plusieurs boucles. Les boucles se distinguant quand même par une branche, sont les **boucles indépendants**. Le schéma sur la figure 1.7 a deux boucles.

#### 1.4. Directions positives des courants, de la f.é.m. et des tensions

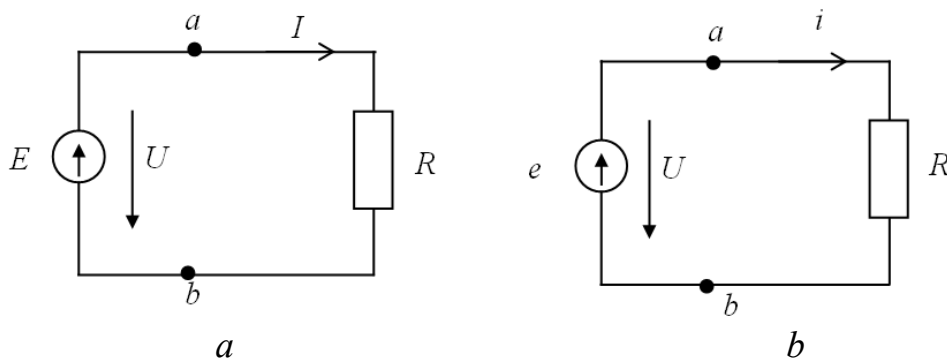
Pour décrire des processus qui se produisent dans un élément de la chaîne, il est nécessaire de connaître non seulement l'ampleur de son courant et sa tension, mais aussi leur sens à ce moment-là. L'une des deux sens possibles de courant dans l'élément on prend pour le principal et l'indiquent sur le schéma par une flèche. Les flèches posées sur les schémas indiquent le sens positif de la f.é.m., des tensions et des courants, c'est-à-dire les directions pour lesquels les valeurs marquées ont des valeurs positives.

Si, par exemple, à un moment donné les valeurs sont positives:  $E > 0$ ,  $U > 0$ ,  $I > 0$ ,  $e > 0$ ,  $u > 0$ ,  $i > 0$ , alors leurs vrais sens à ce moment-là coïncident avec les orientations indiquées dans le schéma par des flèches. Si ces valeurs sont négatives, leurs vrais directions sont opposées aux directions indiquées sur le schéma par les flèches.

A titre exemple la figure 1.8 présente les schémas de deux circuits simples. Les chaînes se composent des sources parfaites de la f.é.m.  $E$  et  $e$  et des lampes électriques  $HL$  directement connectés aux bornes extérieures des sources. Les schémas de substitution de ces circuits sont présentés dans la figure 1.9 où les ampoules électriques sont présentés par des éléments de la résistance  $R$ . La figure 1.10 monte les lignes graphiques des f.é.m. de sources d'alimentation.

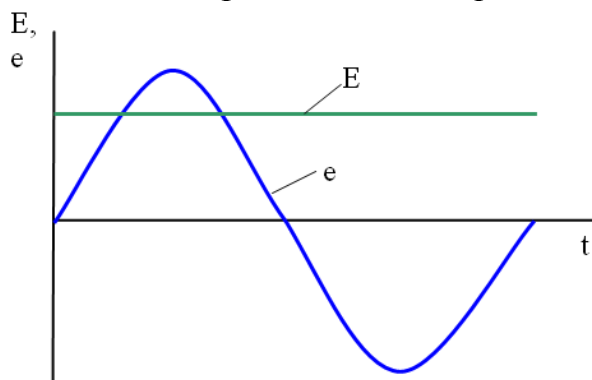


**Figure 1.8** – Schémas de connexion des circuits simples du courant continu (a) et alternatif (b) avec les sources d'alimentation parfaites



**Figure 1.9** – Schémas de substitution des circuits simples du courant continu (a) et alternatif (b) avec les sources d'alimentation parfaites

De cours de physique on sait que la direction positive du mouvement de courant c'est la direction du mouvement des charges positives; le sens positive de la f.é.m. c'est la direction de l'action des forces de tiers à la charge positive; le sens positive de la tension – la direction diminution de potentiel. Parce que les charges positives à l'intérieur de la source se déplacent en direction de l'action des forces de tiers, et dans le récepteur – en direction de diminution du potentiel, alors les sens positif du courant et de la f.é.m. de la source, du courant et de la tension du récepteur sont identiques.



**Figure 1.10** – Graphiques de la f.é.m. des sources d'alimentation: constante  $E$  et sinusoïdale  $e$

Le sens positive de la tension sur les bornes de la source est l'opposé au sens positif du courant de la source. Par conséquent, les charges positives à l'intérieur de la source en ce moment se déplacent dans le sens d'une diminution de potentiel. La puissance de la source  $P = E \cdot I$  ou  $p = e \cdot i$  et la puissance du tronçon de circuit  $P = U \cdot I$  ou  $p = u \cdot i$  seront positifs à condition que les sens positive

de la f.é.m. et de la source de courant sont identiques, ainsi que les sens de la tension et du courant de récepteur.

### 1.5 Règles générales d'exécution des schémas électriques

On utilise les schémas lors de l'étude du principe de fonctionnement des machines, des mécanismes et d'appareillage, lors de leur préparation, montage et réparation, pour comprendre les relations entre les différentes composantes de l'équipement sans préciser la nature de leur conception.

Les règles d'exécution et la conception de circuits régissent les normes du Système Unifié de la Documentation de Conception (SUDC). Les espèces et les types de schémas, des conditions générales de leur mise en œuvre doivent correspondre à la norme d'état 2.701-84 « SUDC. Schéma. Les espèces et les types, l'exigences générales pour la mise en œuvre ». Les réglementation

d'exécution de tous les types de schémas électriques – norme d'état 2.702-75 « SUDC. Les règles d'exécution des schémas électriques ».

Les schémas sont inclus dans l'ensemble de la documentation de conception et contiennent ainsi que tous autres documents, les données requises pour la conception, la fabrication, l'assemblage, le réglage et le fonctionnement de l'équipement.

Pour présenter les éléments et les appareils électriques sur les schémas on utilise les symboles graphiques et les symboles alphanumériques. La représentation graphique et les règles de leur construction sont établies par un groupe des normes SUDC.

Les symboles alphanumériques et les règles de leurs construction sont réglementés par GOST 2.710-81. Pour la construction de notation on utilise des lettres majuscules de l'alphabet et des chiffres arabes. On écrit la notation sous la forme d'une séquence de lettres et de chiffres dans une ligne, sans espaces. Le tableau 1.1 ci-dessous com exemple présente les symboles alphabétiques des certains éléments de circuits électriques.

**Tableau 1.1** – Les symboles alphabétiques des éléments de circuits électriques

<b>La première lettre du code (obligatoire)</b>	<b>Un groupe de types d'éléments</b>	<b>Exemples de types d'éléments</b>	<b>Le code à deux lettres</b>
C	Condensateurs		
G	Générateurs, sources d'alimentation	Batterie	GB
K	Relais, Contacteurs, Démarreurs	Relais de courant Relais de tention	KA KV
L	Selfs, Bobines d'inductance	Ballasts d'éclairage par fluorescence	LL
M	Moteurs à corant continu et alternatif		
P	Appareils de mesure	Ampèremètre Voltmètre Wattmètre	PA PV PW
R	Résistances		
S	Dispositifs de commutation	Interrupteur Interrupteur automatique	SA SF
T	Transformateurs, Auto-transformateurs	Transformateur de courant Transformateur de tension	TA TV

Il faut noter que les normes SUDC s'appliquent aux schémas électriques, qui font partie de la documentation de conception. Dans la littérature académique sur le génie électrique, dans les schémas de substitution on utilisent les symboles traditionnellement adoptées par de nombreux auteurs et qui peuvent différer de celles de SUDC. Par exemple, sur les schémas de substitution une source de la F.E.M. peut être désignée par une lettre minuscule de l'alphabet latin *E*, et en

conformité de SUDC – il faut la désigner par la lettre G (voir tableau 1.1). Lors de la poursuite de la présentation de matériel de notre manuel au cours de l'examen des processus physiques et des principes de fonctionnement des installations électriques, des machines et des appareils nous présenterons les symboles et désignations graphiques de cet équipement sur les schémas électriques.

Les règles de l'exécution des schémas électriques sont décrites en détails dans la littérature [44].

### **Conclusions principales**

1. Les principaux éléments du circuit électrique sont une source d'énergie, le consommateur (récepteur) d'énergie électrique et les éléments de transmission.

2. Le plus souvent on utilise les circuits électriques de courant et de la f.é.m. alternatif (sinusoïdales).

3. Éléments de circuits électriques sont divisés en éléments actifs et éléments passifs.

4. Les paramètres principaux des éléments passifs sont la résistance, l'inductance et la capacité.

5. Au courant continu les paramètres des éléments passifs la capacité et l'inductance n'existent pas.

6. Le schéma de substitution du circuit électrique – modèle de la chaîne, qui permet d'effectuer les calculs des paramètres des éléments et des processus de la chaîne.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Qu'entend-on par un circuit électrique ? Un tronçon de circuit ?
2. Quels sont les éléments du circuit électrique et quel est leur destination ?
3. Qu'entend-on par le courant électrique ?
4. Quels sont les différents types de courant électrique ?
5. Qu'entend-on par la F.É.M. ?
6. Donner un exemple d'un circuit ramifié , (non ramifié) ?
7. Quelle est la différence entre un circuit électrique linéaire est un circuit non linéaire ?
8. Donnez la définition de paramètre de la résistance ? Dans quelles unités on mesure la résistance ?
9. Donnez la définition de paramètre de l'inductance ? Dans quelles unités on mesure l'inductance ?
10. Donnez la définition de paramètre de la capacité ? Dans quelles unités on mesure la capacité ?
11. Expliquez la différence entre les éléments actifs et les éléments passifs du circuit électrique ?
12. Qu'entend-on par l'élément parfait du circuit électrique ? Donnez des exemples.
13. Qu'entend-on par la branche du circuit électrique ?
14. Qu'entend-on par le nœud du circuit électrique ?
15. Qu'entend-on par le boucle du circuit électrique ?
16. Quels sont les sens du courant et de la f.é.m. prises en positif ?



## Chapitre 2 : PROCESSUS PHYSIQUES DANS LES CIRCUITS À COURANT CONTINU

**Notions clés :** loi d'Ohm,  $f$ ; mode d'une source,  $m$  (nominal, marche à vide, court-circuit, accordé); courant de court-circuit,  $m$ ; travail du courant électrique,  $m$ ; puissance du courant électrique,  $f$  (délivrée, utile, des pertes); rendement,  $m$ ; connexion,  $f$  (en série, en parallèle); lois de Kirchhoff,  $fpl$ , (première, deuxième); maille indépendante,  $f$ .

### 2.1 Loi d'Ohm

En 1827 le savant allemand Georg Simon Ohm à la suite des expériences découvrit la loi fondamentale qui définit une dépendance entre les trois paramètres principaux d'un circuit électrique : courant, tension et résistance.

*La loi d'Ohm pour l'ensemble de la chaîne* est formulé de la manière suivante : ***intensité du courant dans un circuit électrique est directement proportionnelle à la valeur de la f.é.m. de la source et est inversement proportionnelle à la résistance complete de la chaîne***

$$I = \frac{E}{R_c}, \quad (2.1)$$

où :

$I$  – intensité du courant dans le circuit, en A ;

$E$  – f.é.m. de la source, en V ;

$R_c$  – résistance complete de la chaîne électrique, en l'Om.

Résistance complete de la chaîne électrique  $R_c$  représente la somme des résistances de charge  $R_{ch}$  (résistance externe de la chaîne), de ligne  $R_L$  (résistance des fils de raccordement) et de résistance interne de la source  $R_0$  :

$$R_c = R_{ch} + R_L + R_0. \quad (2.2)$$

Pour une section de la chaîne la loi d'Ohm est présenté de la manière suivante :

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.3)$$

où :

$I$  – intensité du courant en section du circuit, A ;

$U$  – résistance de cette section du circuit électrique,  $\Omega$ .

De l'examen du rapport (2.3) il resulte que plus la différence de potentiel aux frontières de la section du circuit (plus la chute de tension sur cette section), plus l'intensité du courant pour une valeur donnée de la résistance. Si, lors de la constance de la tension appliquée à la section de la chaîne, changer la valeur de la résistance, l'intensité du courant va changer inversement proportionnelle à la valeur de la résistance.

De la loi d'Ohm il vient que

$$U = I \cdot R, \quad (2.4)$$

c'est-à-dire la chute de tension (souvent désigné comme  $\Delta U$ ) sur la partie de la chaîne est directement proportionnelle à l'intensité du courant et à la valeur de la résistance. Par conséquent, si nous savons que sur une certaine partie de la chaîne avec une résistance constante la force du courant a augmenté, cela signifie que la chute de tension sur cette section a augmenté.

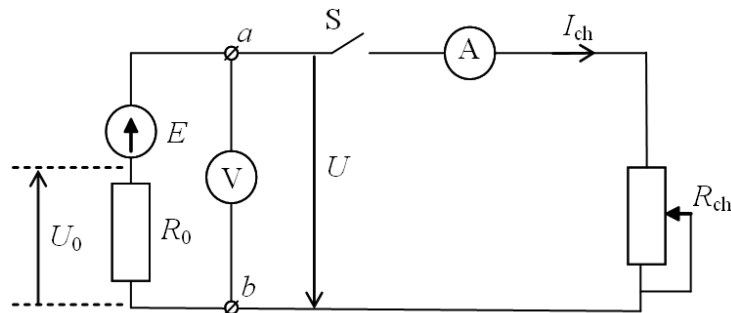
De la loi d'Ohm il vient que

$$R = \frac{U}{I}. \quad (2.5)$$

Ce rapport nous permet de calculer la valeur de la résistance de la section de circuit à partir de la tension et d'intensité du courant. Noton que cette expression ne doit pas être considérée comme une dépendance de la valeur de la résistance électrique de la chute de tension ou de la valeur du courant. De cours de physique on sait que la résistance électrique du conducteur dépend de ses dimensions géométriques et de la température. Cependant, l'expression (2.5) donne la possibilité d'une expérience en définir la valeur d'une résistance mesurée par l'intensité du courant et par la chute de tension due à cette résistance.

## 2.2 Modes de fonctionnement de la source de courant continu

Examinons la nature des changements de tension aux bornes  $a$  et  $b$  de la source de tension continue  $E$ , dont la résistance interne est  $R_0$ , en fonction de la valeur de charge  $R_{ch}$  (voir la figure 2.1).



**Figure 2.1** – Schéma du circuit à courant continu

En raison du fait que (fig. 2.1) la f.é.m. de la source est égale à la somme des chutes de tension due aux résistances d'une section de la chaîne (l'extérieur  $R_{ch}$  et l'intérieur  $R_0$ )

$$E = U + U_0, \quad (2.6)$$

nous pouvons écrire

$$U = E - U_0. \quad (2.7)$$

En utilisant la loi d'Ohm, pouvons exprimer la valeur de chute de tension dans la source nous à travers le courant de charge  $I_{ch}$  et la résistance interne de la source  $R_0$

$$U_0 = I_{ch} \cdot R_0. \quad (2.8)$$

Après la substitution (2.8) à (2.7) nous recevons

$$U = E - I_{ch} \cdot R_0. \quad (2.9)$$

L'expression (2.9) définit la dépendance de la tension aux bornes de la source de la charge, à condition que les valeurs de la f.é.m. et la résistance intérieure de la source soient constantes.

Examinons maintenant les modes possibles de la source de l'énergie électrique et le caractère du changement de la valeur de sa tension en fonction de changement de la charge.

**2.2.1 Régime à vide.** Le régime à vide est considéré comme fonctionnement d'une source d'énergie électrique à la charge déconnectée (fig. 2.1, interrupteur S est ouvert). Alors la résistance de la chaîne extérieure est infiniment grande ( $R_{ch} = \infty$ ) et le courant en chaîne est égal à zéro :

$$I_{ch} = \frac{E}{R_{ch} + R_0} = \frac{E}{\infty + R_0} = 0. \quad (2.10)$$

En ce cas la **tension de marche à vide**  $U_{m.à.v}$  aux bornes de la source sera :

$$U_{m.à.v} = E - 0 R_0 = E, \quad (2.11)$$

c'est-à-dire la tension de marche à vide est égal à la f.é.m. de la source. Donc, un voltmètre connecté aux bornes de la source à la marche à vide montre la force électromotrice de cette source.

**2.2.2 Régime de court-circuit.** Le régime de court-circuit d'une source a lieu quand la valeur de la résistance de charge est pratiquement égale à zéro (fig. 2.1, rhéostat  $R_{ch}$  en position supérieure). Alors la résistance de la chaîne électrique est minimale et est égal à la résistance des fils communicateurs (sur le schéma du remplacement de la figure 2.1 ils ne sont pas montrés), et le courant en chaîne atteint de la signification maximale, appelée **courant de court-circuit** :

$$I_{c-c} = \frac{E}{0 + R_0} = \frac{E}{R_0}. \quad (2.12)$$

De plus, la tension aux bornes de la source sera égal au zéro

$$U = I \cdot R_{ch} = I \cdot 0 = 0, \quad (2.13)$$

et la chute de tension à l'intérieur de la source sera égale à sa f.é.m.

$$E = U + U_0 = 0 + U_0 = U_0. \quad (2.14)$$

Il est nécessaire de souligner que le régime de court-circuit pour la plupart des sources de l'énergie électrique est inadmissible (d'avarie), puisque la résistance intérieure des sources est d'habitude pas grande et le courant apparaissant au court-circuit atteint des valeurs considérables, conduisant à une panne de matériel.

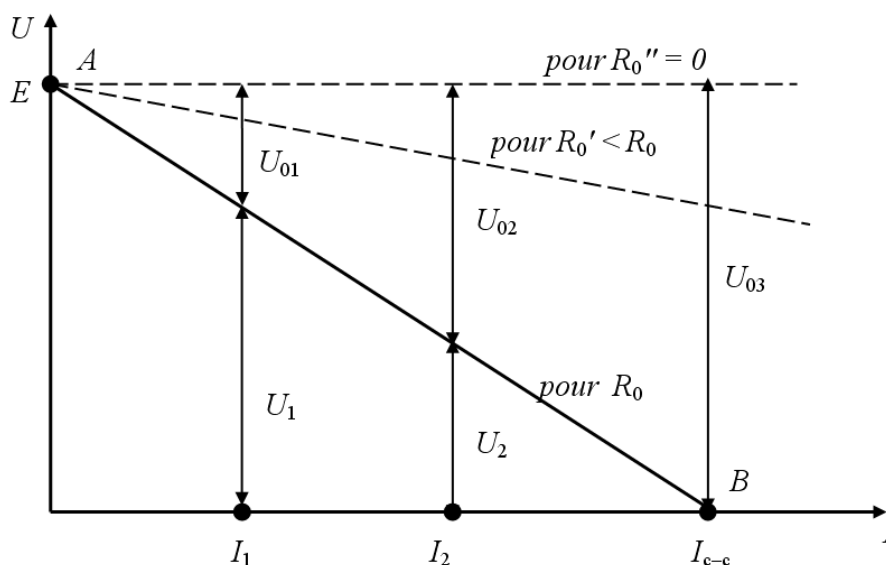
Afin de protéger les sources de l'énergie électrique des courts-circuits on insère dans la chaîne les dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs), qui rompent la chaîne électrique en cas de dépassement du courant de la valeur admissible.

**2.2.3 Mode de fonctionnement à charge.** La charge de la source est quelque consommateur de l'énergie électrique. Sa résistance  $R_{ch}$  définit la valeur du courant de charge

$$I_{ch} = \frac{E}{R_{ch} + R_0} . \quad (2.15)$$

À la réduction de la résistance de charge le courant de charge augmente, ce qui équivaut à l'augmentation de la charge de source.

D'expression (2.9) on voit que l'augmentation du courant de charge provoque la réduction de tension aux bornes de la source. Cette dépendance est linéaire (puisque nous trouvons les valeurs de la f.é.m. et de la résistance intérieure de la source invariable). Son graphique est présenté à la figure 2.2.



**Figure 2.2** – Dépendance de tension de la source du courant de la charge

Le point  $A$  correspond au régime à vide :  $I = 0$ ,  $U = E$ ,  $U_0 = 0$ .

Le point  $B$  correspond au régime de court-circuit :  $I = I_{c-c}$ ,  $U = 0$ ,  $U_0 = E$ .

À n'importe quelle signification intermédiaire du courant de charge  $I_1$  ou  $I_2$  la tension aux bornes de la source est moins que sa f.é.m. sur la valeur de la chute de potentiel à l'intérieur de la source :

$$U_1 = E - U_{01} = E - I_1 \cdot R_0 ; \quad U_2 = E - U_{02} = E - I_2 \cdot R_0 .$$

Ainsi, au changement de la charge, la tension, amené au consommateur, tout le temps change que dans la plupart des cas est indésirable. Pour assurer un maximum de stabilité de tension, il faut obtenir un minimum de résistance interne de la source, alors aux limites identiques du changement du courant de la charge les changements de la tension seront plus petit (sur la figure 2.2 ligne pointillée  $R_0' < R_0$ ).

**2.2.4 Régime nominal.** Le régime nominal de la source se caractérise par ce que sa tension, son courant et sa puissance correspondent à ces significations calculés par la fabrication. Dans ce cas on garantit les meilleurs conditions de fonctionnement (qualité économiques, longévité, etc.).

On indique les valeurs définissant du régime nominal dans le passeport ou sur une plaque fixé à l'installation. Ces données prennent pour la base aux calculs des schémas électriques.

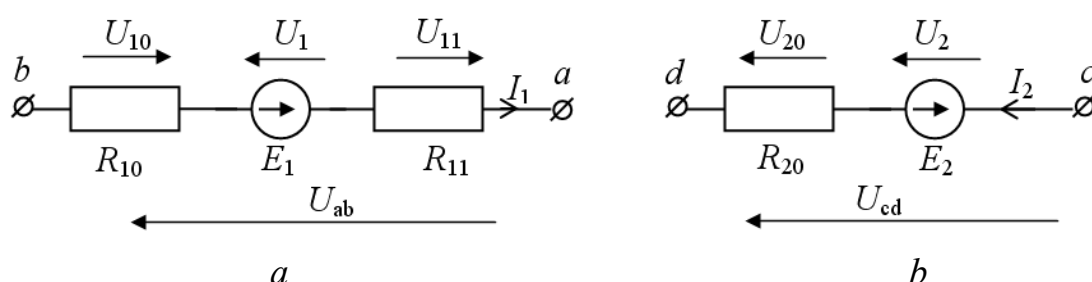
Les principales caractéristiques nominales des installations électrotechniques sont les suivantes : **tension nominale** ( $U_n$ ) et **courant nominal** ( $I_n$ ). Selon la tension nominale font des calculs de l'isolation des fils électriques, et selon le courant nominal – les conditions de leur chauffage singulièrement admissible.

**2.2.5 Régime coordonné.** Comme le régime coordonné de la source on comprend un régime, auquel la source rend à la chaîne extérieure la plus grande puissance.

### 2.3 Loi d'Ohm généralisée pour la section active de la chaîne électrique

Excepté les cas décrits aux chapitres 2.2.1–2.2.5, il y a une autre approche de l'étude de la physique du mode de la source. À la base de cette approche on met le compte du facteur: rend la source l'énergie électrique ou consomme. On peut amener à titre d'exemple le travail de l'accumulateur. Lors du chargement il fonctionne en mode de la consommation de l'énergie électrique, et lors d'alimentation de l'ampoule électrique – en régime de la source de l'énergie électrique.

Nous examinerons cette question à l'exemple de deux section actives de la chaîne (voir la figure 2.3, *a* et *b*). Pour l'éclaircissement des propriétés totales du régime des sections de la chaîne nous écrivons les équations de leur état électrique.



**Figure 2.3** – Schémas des sections actifs du circuit électrique :  
*a* – directions de la tension  $U_{ab}$  et du courant  $I_1$  sont opposés ;  
*b* – directions de la tension  $U_{cd}$  et du courant  $I_2$  sont coïncident

La première source de f.é.m. fonctionne en régime d'une source de l'énergie électrique, puisque les sens de la f.é.m.  $E_1$  et du courant  $I_1$  sont identiques. La deuxième source de f.é.m. fonctionne en régime d'un récepteur de l'énergie électrique, puisque la f.é.m.  $E_2$  et le courant  $I_2$  ont les sens opposés. Les sens des tensions des éléments résistifs coïncident avec le sens du courant, donc, tous ces éléments fonctionnent à titre des récepteurs. Le sens de la tension totale  $U_{ab}$  de la première section est opposé au sens du courant  $I_1$ , et cela permet de faire la conclusion sur ce que la première section génère l'énergie électrique à la chaîne extérieure, qui sera connectée à ses bornes *a* – *b*.

Les sens coïncidant de la tension totale  $U_{cd}$  et du courant  $I_2$  de la deuxième section indiquent au fonctionnement de cette section à titre du récepteur d'énergie.

La tension de la section est égal à la somme algébrique des tensions de ses éléments. En ce cas les tensions, dont les sens coïncident avec le sens de la tension totale, sont désignés par le signe « + », les tensions dont les sens ne coïncident pas – par le signe « - » :

$$U_{ab} = - U_{11} + U_1 - U_{10} = U_1 - (U_{11} + U_{10}) ,$$

$$U_{cd} = U_2 + U_{20} .$$

En remplaçant les tensions des éléments passifs par leurs chutes des tensions et les tensions des sources – par leur f.é.m., nous recevrons

$$U_{ab} = E_1 - (R_{11} + R_{10}) \cdot I_1 , \quad (2.16)$$

$$U_{cd} = E_2 + R_{20} \cdot I_2 . \quad (2.17)$$

De l'équation (2.16) il suit que la direction valable de la tension de la section coïncidera avec la direction conventionnellement choisi  $U_{ab} > 0$  et désigné sur le schéma par la flèche à condition que

$$(R_{11} + R_{10}) \cdot I_1 < E_1 .$$

Cela peut se passer, quand le courant de la charge  $I_1$  de la section est moins que le courant du court-circuit  $I_{1c-c} = E_1 / (R_{11} + R_{10})$  de cette section.

Donc, **la section active rend l'énergie à la chaîne extérieure** dans le cas *où les sens valables de son courant et sa tension sont opposés*, c'est à dire  $I_1 < I_{1c-c}$ .

En cas  $I_1 > I_{1c-c}$  la tension  $U_{ab} < 0$  et son sens valable coïncide avec le sens du courant de la section, c'est à dire nous avons le régime du récepteur.

De l'équation (2.17) on voit que la deuxième section caractérise le régime du récepteur à  $R_{20} \cdot I_2 > 0$  ou  $I_2 > 0$ , c'est à dire quand  $U_{cd} > E_2$ .

Ainsi, **la section active avec les sens coïncidant positives du courant et de la tension se trouve en régime du récepteur dans le cas où la tension amené à lui est plus que la f.é.m. de la section.**

En cas  $U_{cd} < E_2$  le courant  $I_2 < 0$  et son sens valable est opposé à indiqué sur le schéma par la flèche. Alors sa section caractérise l'installation génératrice rendant l'énergie à la chaîne extérieure.

Pour obtenir les équations en vue générale qui lient le courant à la f.é.m., la tension et la résistance de la section active, nous définirons les courants des sa sections donnés des équations (2.16) et (2.17)

$$I_1 = \frac{+ E_1 - U_{ab}}{R_{11} + R_{10}} ,$$

$$I_2 = \frac{- E_2 + U_{cd}}{R_{20}} .$$

En vertu de ces équations on peut écrire l'équation totale du courant de la section active :

$$I = \frac{\pm E \mp U}{R} . \quad (2.18)$$

Cette équation exprime **la loi d'Ohm généralisée pour la section active de la chaîne électrique**, selon qui **le courant de la section active de la chaîne est**

**égal à la somme algébrique de sa tension et sa f.é.m., divisé au résistance de cette section.**

Les f.é.m. et les tensions prennent avec le signe « + », si leurs sens coïncident avec le sens du courant, et avec le signe « - », quand leurs sens sont opposés au sens du courant.

## 2.4 Travail et puissance du courant continu

**2.4.1 Travail du courant électrique.** Au passage d'un courant électrique dans un conducteur s'accomplit le travail du déplacement des charges. Du cours de physique on sait que le travail que réalise le courant électrique sur la section de la chaîne est directement proportionnel à la chute de potentiel sur cette section, à l'intensité du courant et au temps du passage de ce courant :

$$A = U \cdot I \cdot t. \quad (2.19)$$

L'unité de mesure du travail du courant électrique est le joule (J) ou le watt-seconde :

$$1J = 1V \cdot A \cdot s = 1W \cdot s.$$

À partir de la formule (2.19), en utilisant diverses formes d'écriture de la loi d'Ohm, par simple transformation, on peut obtenir les relations suivantes

$$A = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (2.20)$$

$$A = \frac{U^2 \cdot t}{R}. \quad (2.21)$$

En fonction du type du consommateur le processus de l'accomplissement du travail par le courant électrique est accompagné par la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique (dans les réchauds), mécanique (dans les électromoteurs) ou lumineux (dans les installations d'éclairage).

**2.4.2 Puissance du courant électrique.** La valeur, qui caractérise la vitesse d'exécution du travail, ou la vitesse de conversion de l'énergie, on appelle la puissance. ***La puissance électrique (P) est le travail effectué par le courant électrique à l'unité de temps***

$$P = \frac{A}{t}. \quad (2.22)$$

À partir de l'expression (2.22) on peut écrire

$$P = U \cdot I, \quad (2.23)$$

c'est à dire, la puissance développée sur la section de la chaîne par le courant électrique est directement proportionnelle à la tension et à l'intensité du courant de cette section.

L'unité de mesure de la puissance est le watt:  $1W = 1V \cdot 1A$ .

Du rapport (2.23) par voie des transformations simples on peut recevoir les formules suivantes pour le calcul de la puissance :

$$P = I^2 \cdot R, \quad (2.24)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (2.25)$$

La puissance, développée par la source de l'énergie électrique dans toute la chaîne, s'appelle la **puissance complète**. La puissance complète ( $P_c$ ) est définie par la force électromotrice de la source et la valeur du courant de la charge (fig. 2.1)

$$P_c = E \cdot I_{ch}. \quad (2.26)$$

Puisque la f.é.m. de la source est égale à la somme des chutes de tensions sur les sections extérieures et intérieures de la chaîne (voir la figure 2.1), nous pouvons écrire

$$P_c = (U + U_0) I_{ch} = U \cdot I_{ch} + U_0 \cdot I_{ch}. \quad (2.27)$$

La valeur  $U \cdot I_{ch}$  exprime la puissance développée sur la section extérieure de la chaîne, c'est à dire la puissance consommée par la charge. Elle s'appelle la **puissance utile** (puissance de la charge)

$$P_{ch} = U \cdot I_{ch}. \quad (2.28)$$

La valeur de  $U_0 \cdot I_{ch}$  exprime la puissance, dépensée à l'intérieur de la source, et s'appelle la **puissance des pertes**

$$P_{perts} = U_0 \cdot I_{ch}. \quad (2.29)$$

Dans les calculs pratique dans le schéma de substitution souvent on prend en considération la résistance de ligne  $R_L$ . Dans ce cas, la puissance des pertes est définie

$$P_{perts} = U_0 \cdot I_{ch} + U_L \cdot I_{ch} = I_{ch}^2 \cdot (R_0 + R_L). \quad (2.30)$$

Ainsi, la puissance complète est égale à la somme de la puissance utile et de la puissance des pertes:

$$P_c = P_{ch} + P_{perts}. \quad (2.31)$$

**2.4.3 Le rendement.** En prenant compte que la source ne donne pas toute sa puissance au consommateur on introduit la notion de **rendement** de la source  $\eta$  comme la relation de sa puissance utile à sa puissance complète :

$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_c}, \text{ ou en pourcentage } \eta = \frac{P_{ch}}{P_c} 100\%. \quad (2.32)$$

Le rendement (coefficient d'efficacité) peut être exprimé et dans d'autres valeurs caractérisant la chaîne électrique (voir la figure 2.1)

$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_c} = \frac{U \cdot I_{ch}}{E \cdot I_{ch}} = \frac{U}{E}, \quad (2.33)$$

ou

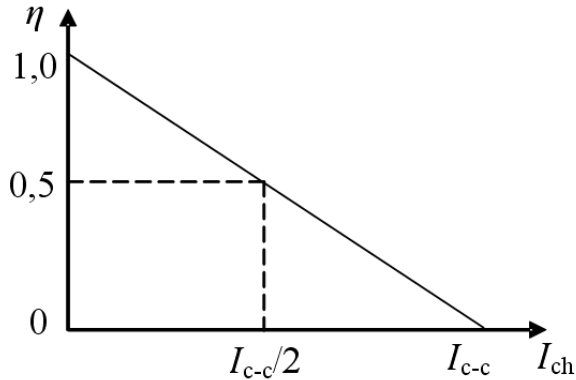
$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_{ch} + P_0} = \frac{I_{ch}^2 \cdot R_{ch}}{I_{ch}^2 R_{ch} + I_{ch}^2 \cdot R_0} = \frac{R_{ch}}{R_{ch} + R_0}, \quad (2.34)$$



ou bien

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{E - U_0}{E} = 1 - \frac{U_0}{E} = 1 - \frac{I_{ch} \cdot R_0}{I_{cc} \cdot R_0} = 1 - \frac{I_{ch}}{I_{cc}}. \quad (2.35)$$

La figure 2.4 illustre la courbe de dépendance du rendement de la source du courant de la charge. À la marche à vide le courant est égal à zéro et le rendement est égal à 1. Au court-circuit le courant atteint la valeur maximale, mais le rendement dans ce cas est égal à zéro, puisque la source n'est pas fait aucun travail utile et toute l'énergie se dépense à l'intérieur de la source.



**Figure 2.4** – Dépendance  $\eta = f(I_{ch})$

Il faut comprendre l'égalité du rendement à l'unité à la marche à vide qu'à l'approche du mode de la source vers le régime de la marche à vide son rendement aspire à l'unité. Cela réussit alors, quand la résistance de la charge à plusieurs reprises dépasse la résistance intérieure de la source. Les pertes de l'énergie à l'intérieur de la source dans ce cas sont considérablement moins de puissance utile. Du graphique on voit

qu'en cas de respect de condition d'obtenir le maximum de la puissance utile de la source à  $I_{ch} = I_{cc}/2$  son rendement fait seulement 0,5 (voir aussi le chapitre 2.5).

Les générateurs électriques des groupes-moteurs sont calculés sur le travail en régimes assurant le maximum de rendement. Près des générateurs modernes il atteint 98–99 %.

**2.4.4 L'action thermique du courant.** Le courant électrique, en passant par le conducteur, le chauffe, puisque dans le conducteur il y a une transformation de l'énergie électrique en énergie thermique. L'essence physique du phénomène réside dans le fait que les mobiles porteurs de charge lors de leur mouvement ordonné se cognent aux atomes de la substance et leur rendent une partie de leur énergie cinétique, aux frais de quoi l'agitation thermique des derniers devient plus intense. Dans les métaux, par exemple, les électrons « libres » sont confrontés aux ions de la grille cristalline, leur rendent la partie de l'énergie cinétique. Le mouvement vibratoire des ions se renforce grâce à quoi augmente la température du conducteur.

Si au passage du courant électrique à travers un conducteur ne se passe pas des transformations supplémentaires de l'énergie électrique en énergie chimique, mécanique ou lumineux, alors toute l'énergie allant sur le déplacement des charges électriques se transforme en thermique. Alors se détache la quantité de chaleur  $Q$  équivalent au travail du courant électrique

$$Q = A = U \cdot I \cdot t \text{ ou } Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.36)$$

La quantité de chaleur s'exprime ici dans les joules.

Dans les comptes techniques on mesure souvent l'énergie thermique dans les calories (1 calorie est une quantité de la chaleur nécessaire à la chauffe de 1 gramme de l'eau sur 1 degré de Tsel'siya). Un joule fait 0,24 calories, c'est pourquoi la valeur de 0,24 calories/joules appellent comme ***l'équivalent thermique du travail***.

La quantité de chaleur exprimée dans les calories, qui se détache dans un conducteur au passage du courant électrique, s'exprime le plus souvent comme

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.37)$$

Ce rapport était reçu pour la première fois par la voie expérimentée indépendamment l'un de l'autre par le savant anglais D. P. Joule (1841) et le savant russe E. Ch. Lentz (1842) et porte le nom de ses découvreurs – ***la loi de Joule-Lenz***.

***La quantité de chaleur, mise en relief par le courant électrique dans un conducteur, est directement proportionnelle au carré de l'intensité du courant, de la valeur de résistance du conducteur et du temps, au cours du quel passe le courant.*** À l'exception de la formule (2.37) la loi de Joule-Lenz peut être exprimée par les rapports suivants :

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t, \quad \text{ou} \quad Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t. \quad (2.38)$$

Puisque dans le système du SI l'énergie thermique est mesurée dans les joules et la loi de Joule-Lenz s'inscrit sous la forme suivante :

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.39)$$

## 2.5 Conditions de délivrance de la puissance maximale par une source

En prenant compte que la tension et le courant (fig. 2.1) dans la résistance de la chaîne extérieure  $R_{ch}$  sont lié par l'équation  $U = I_{ch} \cdot R_{ch}$  (la loi de l'Ohm pour la section passive de la chaîne électrique, on peut inscrire :

$$E = U_0 + U = I_{ch} \cdot R_0 + I_{ch} \cdot R_{ch}. \quad (2.40)$$

Cette équation exprime l'état électrique de la chaîne la plus simple fermée. De (2.40) nous pouvons recevoir :

$$I_{ch} = E / (R_0 + R_{ch}). \quad (2.41)$$

La puissance de la source l'alimentation en ce cas

$$P_{source} = I_{ch}^2 \cdot (R_0 + R_{ch}) = E^2 / (R_0 + R_{ch}), \quad (2.42)$$

et la puissance mise en relief sur la charge

$$P_{ch} = R_{ch} \cdot I_{ch}^2 = R_{ch} \cdot E^2 / (R_0 + R_{ch})^2. \quad (2.43)$$

La puissance de la charge  $P_{ch}$  à la marche à vide ( $R_{ch} = \infty$ ) et au court-circuit ( $R_{ch} = 0$ ) est égale à zéro. Elle a la valeur maximale, quand la relation

$R_{ch}/(R_0 + R_{ch})^2$  est maximale. Ayant pris la première dérivée de cette fraction selon  $R_{ch}$  et ayant assimilé son zéro, nous recevrons

$$\frac{d}{dR_{ch}} \cdot \frac{R_{ch}}{(R_0 + R_{ch})^2} = \frac{(R_0 + R_{ch})^2 - 2R_0(R_0 + R_{ch})}{(R_0 + R_{ch})^2} = 0,$$

ou  $(R_0 + R_{ch})^2 - 2R_0(R_0 + R_{ch}) = 0,$

d'où vient  $R_{ch} = R_0.$  (2.44)

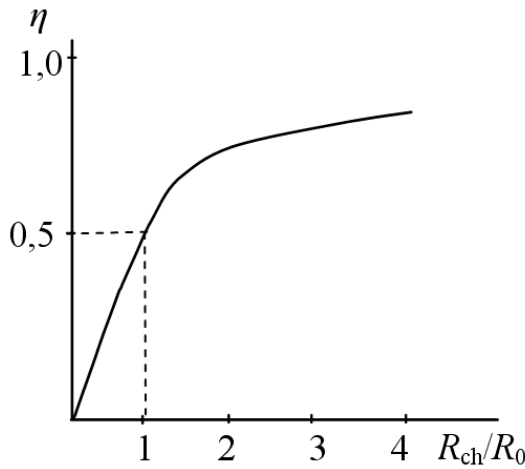
Donc, **la puissance de la chaîne extérieure est maximale quand la résistance de la chaîne extérieure  $R_{ch}$  est égale à la résistance interne  $R_0$  de la source**, i.e. quand la chaîne extérieure et la source travaillent en régime coordonné.

En régime coordonné la puissance des pertes à l'intérieur de la source  $\Delta P_{pertes.s}$  est égale à la moitié de la puissance de la source :

$$\Delta P_{pertes.s} = R_0 \cdot I^2 = R_{ch} \cdot I^2 = E \cdot I / 2. \quad (2.45)$$

Examinons le changement du rendement de la source en fonction de la valeur de la résistance  $R_{ch}$ . **Le rendement d'une source est égal à la relation de la puissance de la chaîne extérieure  $P_{ch}$  à la puissance complète  $P_c$  de la source :**

$$\eta = \frac{P_{ch}}{P_c} = \frac{R_{ch} \cdot I^2}{(R_0 + R_{ch}) \cdot I^2} = \frac{R_{ch}}{(R_0 + R_{ch})} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_{ch}}}. \quad (2.46)$$



**Figure 2.5** – Graphique de dépendance  $\eta$  du rapport  $R_{ch}/R_0$

De la formule (2.46) on voit qu'à la marche à vide, quand  $R_{ch} = \infty$ , le rendement  $\eta_{m.à.v} = 1$ ; au court-circuit, quand  $R_{ch} = 0$ , le rendement  $\eta_{c-c} = 0$ ; en régime coordonné ( $R_{ch} = R_0$ ) les rendements  $\eta_{coord} = 0,5$ .

Sur la figure 2.5 on montre le graphiques de dépendances de  $\eta$  de la valeur relative de la résistance de la chaîne extérieure  $R_{ch}/R_0$ .

Notons que dans les conditions pratiques le régime nominal des sources puissantes coïncide rarement au régime coordonné, puisque le rendement est égal à 0,5, et le courant de charge de la source est considérablement plus de courant nominal. Cette dernière circonstance peut amener à une surproduction de chaleur à l'intérieur de la source.

Le régime coordonné est utilisé si le rendement bas n'a pas la signification décisive à cause de la puissance basse de la chaîne. Quand les questions de l'économie sont décisant, la résistance intérieure  $R_0$  de la source doit être peu en comparaison de la résistance  $R_{ch}$  de la chaîne extérieure. Dans ce cas le régime nominal de la source est plus proche du régime de la marche à vide et le rendement de la source est proche de l'unité.

## 2.6 Schémas de connexions des éléments de la chaîne

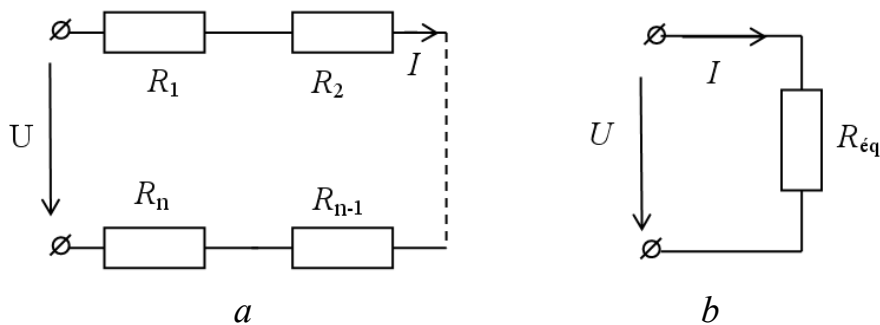
Les variantes possibles de la liaison des éléments des chaînes du courant continu nous examinerons à l'exemple de la liaison des électrorécepteurs passifs.

**2.6.1 Connexion en série des éléments de la chaîne.** *On appelle connexion en série une telle liaison à laquelle dans chacun des éléments passe le même courant.* Lors de la connexion en série des  $n$  éléments les courants dans le schéma donné (fig. 2.6, *a*) et dans le schéma équivalent (fig. 2.6, *b*) seront identiques. A partir de la deuxième loi de Kirchhoff (voir le chapitre. 2.7) nous pouvons inscrire

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U,$$

ou

$$R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots + R_n \cdot I = R_{\text{éq}} I.$$



**Figure 2.6** – Connexion des résistances en série (*a*) et la résistance équivalente (*b*)

De l'équation (2.47) recevrons la formule de la résistance équivalente

$$R_{\text{éq}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.47)$$

**La résistance équivalente des éléments connecté en série est égale à la somme des résistances des éléments séparés.** Pour l'analyse des modes du schéma nous inscrirons en vue générale les équations suivantes de la chaîne :

pour le courant

$$I = U/R_{\text{éq}} ; \quad (2.48)$$

pour la tension du  $n$ -ème élément

$$U_n = R_n \cdot U/R_{\text{éq}} ; \quad (2.49)$$

pour la puissance consommée par  $n$ -m élément

$$P_n = R_n \cdot I^2 = R_n \cdot U^2/R_{\text{éq}}^2. \quad (2.50)$$

En vertu de ces équations on peut recevoir certaines **propriétés totales des circuits en série** :

1. À partir des équations (2.48) et (2.49) on voit qu'entre la tension sur l'entrée du schéma, le courant et la tension de ses éléments séparés il y a une dépendance linéaire. Tout changement de la tension  $U$  en  $k$  fois entraîne le changement du courant et de la tension de chaque élément aussi en  $k$  fois. La puissance de toute la chaîne et ses éléments séparés alors change en  $k^2$  fois.

2. Le courant de toute la chaîne et la tension de ses éléments dépendent de la valeur de la résistance de chacun des éléments de la chaîne. Dans ce cas, si la résistance d'un élément augmente, le courant dans le circuit et les tensions des éléments avec les résistances invariables diminuent, et la tension de l'élément avec la résistance augmentant augmente. À la limite, quand la résistance de cet élément est égale à l'infini (marche à vide), la tension sur les bornes, à l'aide des quelles l'élément a été joint à l'autre partie de la chaîne, sera égale à la tension du réseau.

L'interdépendance complète des modes des éléments connectés en série est le signe caractéristique de cette liaison.

**Le couplage en série des récepteurs utilisent dans le cas quand leurs valeurs nominales de tension sont plus moins que la tension du réseau.** Si, par exemple, les récepteurs ont les valeurs nominales de tension de 110 V et la tension du réseau 220 V, alors on peut joindre ces récepteurs successivement et insérer sous tension du réseau. Cependant il faut avoir en vue que **la résistance du récepteur est en raison inverse de sa puissance nominale**  $R = U_n^2/P_n$ . C'est pourquoi le récepteur à plus grande puissance nominale travaillera avec le chargement incomplet, et le récepteur de la plus petite puissance nominale – avec la surcharge. **Les récepteurs aux tensions nominales identiques connectés en série auront les meilleurs conditions de travail s'ils ont les puissances nominales identiques.**

Dans les divers domaines de la technique on trouvent nombreuses exemples applications des couplages des éléments en série. Par exemple, à l'utilisation de moteur du courant continu on insère en série avec la chaîne de l'ancre les résistances réglables pour limiter le courant de mise en marche (rhéostat de mise en marche, voir le chapitre 10.9) et pour le réglage de la vitesse (rhéostat régulateur, voir les paragraphes 10.9, 15.2.2) ou pour la régulation de vitesse (rhéostat de réglage, voir les paragraphes 10.9, 15.2.2).

Dans le praticien des mesures électriques des résistances successivement jointes on forme les magasins de mesure des résistances, par l'insertion successive des résistances supplémentaires vers l'appareil de mesure de tension on obtient l'élargissement des limites de la mesure de la tension.

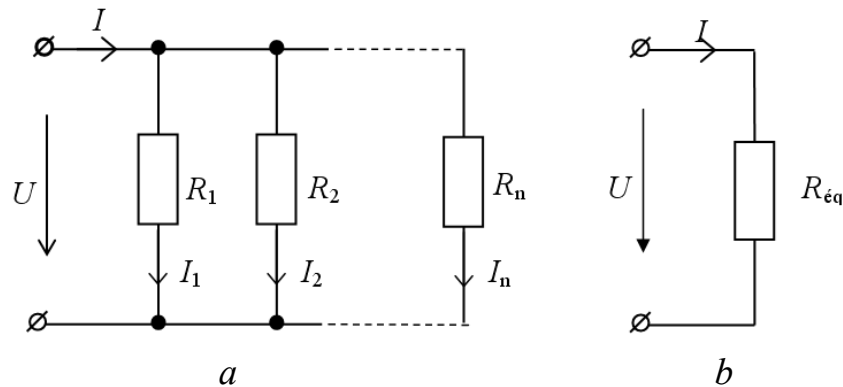
**2.6.2 Connexion en parallèle des éléments de la chaîne.** La figure 2.7, *a* montre le schéma avec  $n$  branches passives adjointes aux mêmes noeuds *a* et *b*, la différence des potentiels entre lesquels est égale à la tension de la source  $U$ . C'est pourquoi le courant dans chacune des branches est déterminé par la tension entre les noeuds et la résistance  $R_n$  ou la conductibilité  $G_n = 1/R_n$  :

$$\begin{cases} I_1 = U/R_1 = G_1 \cdot U ; \\ \dots \\ I_n = U/R_n = G_n \cdot U . \end{cases} \quad (2.51)$$

Le fait, que **la connexion en parallèle assure la tension identique sur tous les récepteurs insérés et leurs modes indépendants l'un de l'autre**, est un important avantage de ce couplage, grâce auquel elle a trouvé une large application. En général, on insère les récepteurs de l'énergie électrique dans le réseau parallèlement.

Pour caractériser le travail du circuit en parallèle nous définirons sa résistance équivalente. Les conditions de l'équivalence seront respectées, si le courant  $I_{\text{eq}}$  passant par la chaîne équivalente  $R_{\text{eq}}$  (fig. 2.7, b) est égal au courant  $I$  en partie non ramifiée de la chaîne ou à la somme des courants des branches séparées, connectées en parallèles :

$$I_{\text{eq}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n . \quad (2.52)$$



**Figure 2.7** – Schéma de la chaîne à une connexion des éléments résistifs en parallèle (a) et sa schéma équivalente (b)

En mettant à cette équation les significations des courants de (2.51), nous recevrons l'expression

$$G_{\text{eq}} \cdot U = G_1 \cdot U + G_2 \cdot U + \dots + G_n \cdot U ,$$

à partir de laquelle on peut déduire la formule de la conductivité équivalente

$$G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G_k , \quad (2.53)$$

ou la formule de la résistance équivalente

$$1/R_{\text{eq}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum 1/R_k . \quad (2.54)$$

Donc, **à connexion en parallèle la conductivité équivalente de la chaîne est égale à la somme des conductivités des branches séparées**. Car la plus grande conductivité possède une branche de moindre résistance, la conductibilité de la circuit en parallèle ne peut pas être moins de conductibilité de la branche avec la plus petite résistance. **La résistance équivalente de la chaîne en parallèle est inversement proportionnelle de sa conductibilité équivalente :**

$$R_{\text{eq}} = 1/G_{\text{eq}} , \quad (2.55)$$

c'est pourquoi elle est toujours inférieure à la plus petite des résistances de la branche.

Il faut prendre en compte qu'à la connexion du nouveau récepteur la branche supplémentaire parallèle se forme au réseau, la conductibilité totale de la chaîne augmente de plus, et sa résistance équivalente diminue. Si  $n$  branches à mêmes résistances  $R$  sont connecté en parallèle, leur résistance équivalente sera à  $n$  fois moins de la résistance d'une branche:  $R_{\text{eq}} = R/n$ . La réduction de la résistance totale de la chaîne sera accompagnée par l'augmentation du courant et de la puissance :

$$P = U \cdot I = U \cdot (I_1 + I_2 + \dots + I_n),$$

ou bien

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

***La puissance de la chaîne, composée des branches parallèles, est égale à la somme des puissances de ses branches séparées.***

L'intérêt pratique présente la chaîne avec deux résistances parallèlement insérées ayant les résistances  $R_1$  et  $R_2$ . La résistance équivalente d'une telle chaîne est égale au produit des résistances, divisées en leur somme :

$$R_{\text{eq}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.56)$$

Les courants des branches de cette chaîne sont

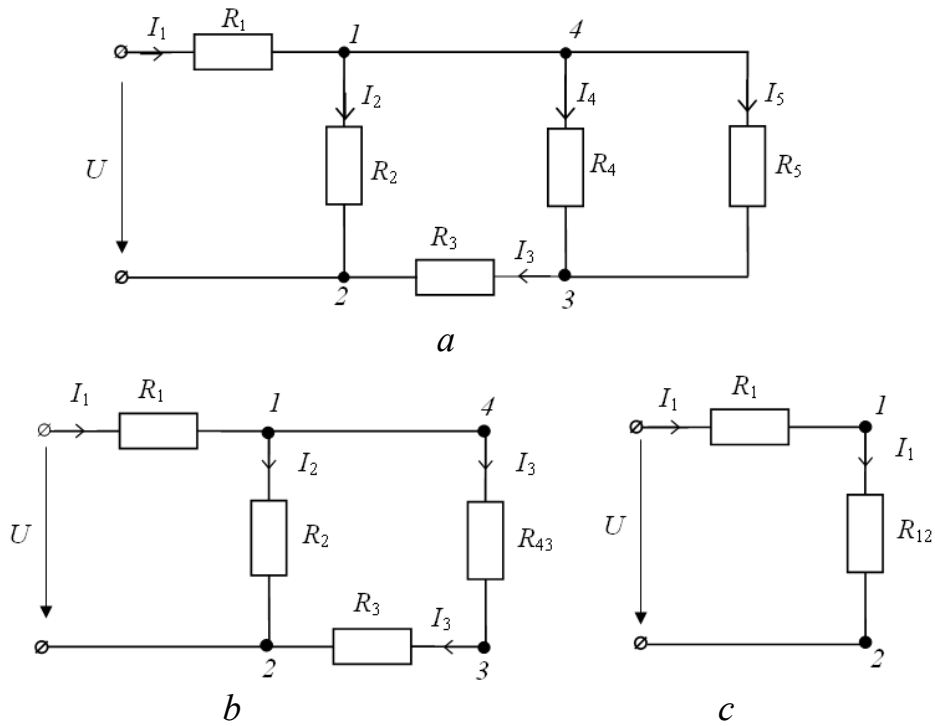
$$\begin{cases} I_1 = U/R_1 = R_{\text{eq}} \cdot I / R_1 = R_2 \cdot I / (R_1 + R_2), \\ I_2 = U/R_2 = R_{\text{eq}} \cdot I / R_2 = R_1 \cdot I / (R_1 + R_2). \end{cases} \quad (2.57)$$

Selon les rapports reçus le courant en une des branches parallèles de la chaîne est égal au courant de la section non ramifié de la chaîne, multiplié sur la relation de la résistance de la branche opposée et la somme des résistances des branches.

**2.6.3 Couplage mixte des éléments de la chaîne.** Comme le couplage mixte des éléments on appellent une combinaison leurs connexions en série et en parallèle. Le plus simple couplage mixte, répandu dans le praticien, est la chaîne de la connexion ordinaire parallèle des récepteurs à la boîte de distribution lors de la connexion de cette boîte à une source d'alimentation à l'aide des câbles.

Les schémas du couplage mixte des installations électrotechniques sont très divers. Nous examinerons à titre d'exemple un schéma, monté sur la figure 2.8, *a*.

Que toutes les résistances des éléments résistifs des branches et la tension d'entrée de ce schéma (fig. 2.7, *a*) soient données et il faut définir les courants de ses branches séparés. Pour le calcul nous utilisons ***la méthode des transformations équivalentes***, selon laquelle ***les sections du schéma en série ou en parallèle remplacent par un élément équivalent***. Par la transformation graduelle des sections on simplifie le schéma et amènent au schéma le plus simple comprenant un élément équivalent.



**Figure 2.8** – Schéma d'une chaîne à couplage mixte des éléments résistifs (a) et ses schémas équivalents (b et c)

Ainsi, les branches avec les résistances  $R_4$  et  $R_5$  (fig. 2.8, a) sont jointes parallèlement, et on peut les remplacer par une branche équivalente dont la résistance

$$R_{43} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}. \quad (2.58)$$

Après cela le schéma se simplifie un peu et prend la forme du schéma monté sur la figure 2.8, b dont les éléments aux résistances  $R_3$  et  $R_{43}$  sont connectés en série. À son tour la branche 1-4-3-2 est jointe parallèlement à la branche  $R_2$ , c'est pourquoi la résistance équivalente des deux branches de la section 1-2

$$R_{12} = \frac{R_2(R_3 + R_{43})}{R_2 + R_3 + R_{43}}. \quad (2.59)$$

L'élément résistif de la résistance  $R_{12}$  est connectés en série au élément de la résistance  $R_1$ , comme est indiqué sur le schéma de la figure 2.8, b. La résistance total ou d'entrée de ce schéma  $R_t = R_{12} + R_1$  donne la possibilité de définir le courant total du schéma initial (fig. 2.8, a)

$$I_1 = U/R_t. \quad (2.60)$$

Puis, en revenant au schéma de la figure 2.8, a, on peut trouver la tension sur la section 1-2 :

$$U_{12} = R_{12} \cdot I_1,$$

et les courants dans les résistances  $R_2$  et  $R_3$  (fig. 2.8, b) :

$$I_2 = U_{12}/R_2 \text{ et } I_3 = U_{12}/(R_{43} + R_3). \quad (2.61)$$



Le courant  $I_3$  passe aussi par l'élément équivalent avec la résistance  $R_{43}$  dont la chute de tension est égale à la tension sur la section 4-3 du schéma initial (fig. 2.8, a) :

$$I_3 = \frac{U_{12}}{R_{43} + R_3} \quad \text{et} \quad U_{43} = I_3 \cdot R_{43} .$$

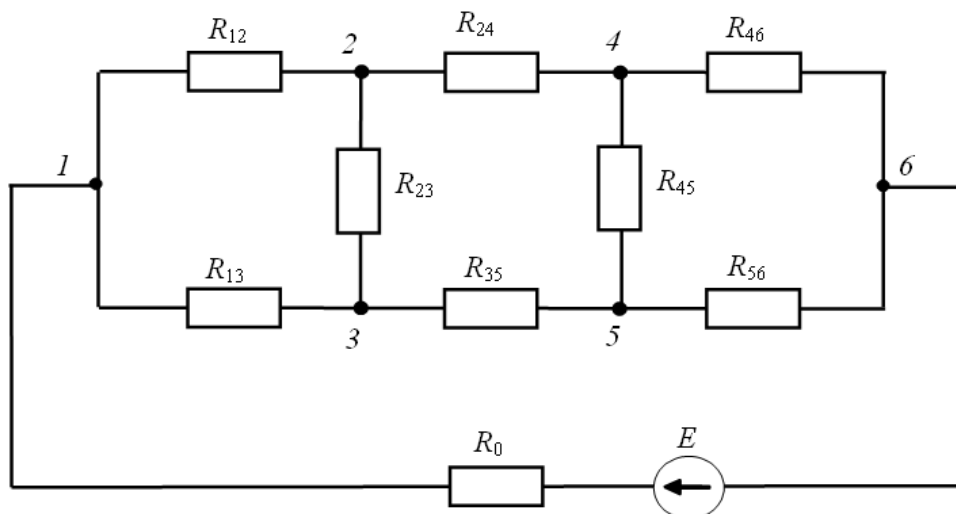
En connaissant la tension  $U_{43}$ , on peut trouver les courants des autres sections :

$$I_4 = U_{43}/R_4 \quad \text{et} \quad I_5 = U_{43}/R_5 . \quad (2.62)$$

L'ordre de calcul du schéma au couplage mixte des éléments passifs, examiné plus haut, a reçu le nom de **méthode de la transformation équivalente**. L'essentiel de cette méthode, comme on voit de l'exemple mentionné ci-dessus, se résume à la simplification successive du schéma de la liaison des éléments passifs par voie du remplacement des sections en série ou en parallèle par leurs schémas équivalents, obtenues à partir des équations de (2.45) pour les sections en série ou des équations (2.53 et 2.54) pour les sections en parallèle.

**2.6.4 Transformations équivalentes des liaisons des éléments passifs en étoile et en triangle.** Il y a des schémas qui ont une connexion des éléments si complexe qu'ils ne peuvent pas être considérés comme un couplage en parallèle ou bien en série. Nous examinerons un des tels schémas, quand sa partie forme un triangle, dont les sommets sont trois noeuds, et les côtés – trois branches passives insérées entre ces noeuds. Pour simplifier le calcul des schémas semblables il arrive en plusieurs cas plus facile de remplacer le triangle par l'étoile équivalente.

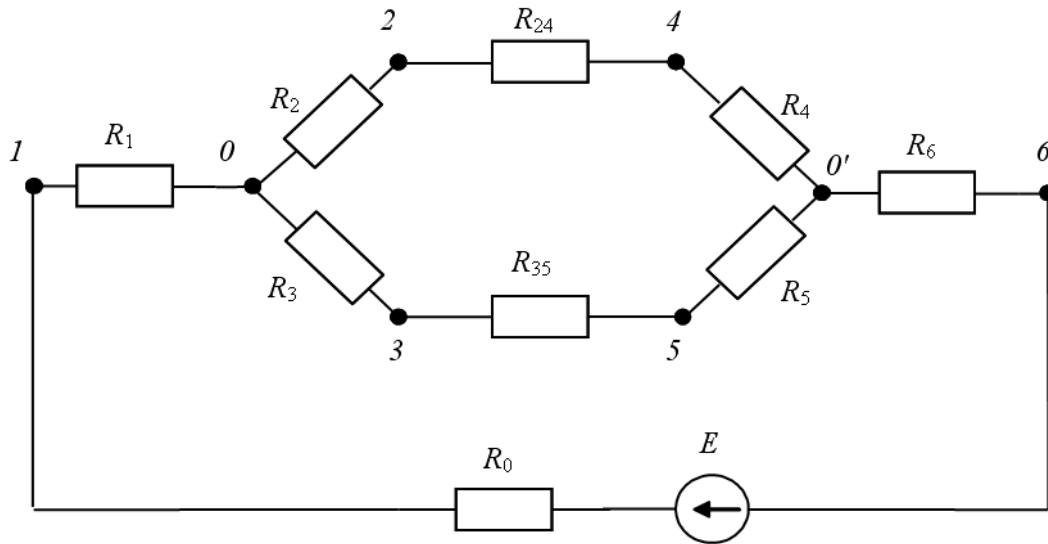
Nous examinerons un schéma avec deux triangles des résistances 1-2-3 et 4-5-6 (voir la figure 2.9) et sa transformation dans un schéma avec les étoiles équivalentes (fig. 2.10) avec les résistances des rayons  $R_1, R_2, R_3$  et  $R_4, R_5, R_6$ . Une telle transformation du schéma de connexion des éléments en triangle dans un schéma de connexion des éléments en l'étoile donne la possibilité de simplifier le calcul du schéma.



**Figure 2.9** – Schéma du réseau avec deux sections de couplage des résistances en triangle

Nous définirons les équations liant les résistances équivalentes du triangle et d'étoile (fig. 2.11, *a* et *b*).

Pour résoudre le problème utilisons une condition générale d'équivalence, selon laquelle les courants dans les branches du schéma, non soumis à la transformation, doivent rester sans changement. Cela signifie que les courants dirigés vers les noeuds 1, 2 et 3 sur les fils des schémas du triangle (fig. 2.9) et d'étoile (fig. 2.10), doivent être identiques. La condition d'équivalence doit être respectée en tous régimes, y compris en cas de rupture d'un des fils connectés aux noeuds 1, 2 et 3.



**Figure 2.10** – Schéma équivalent avec deux sections de couplage des résistances en étoile

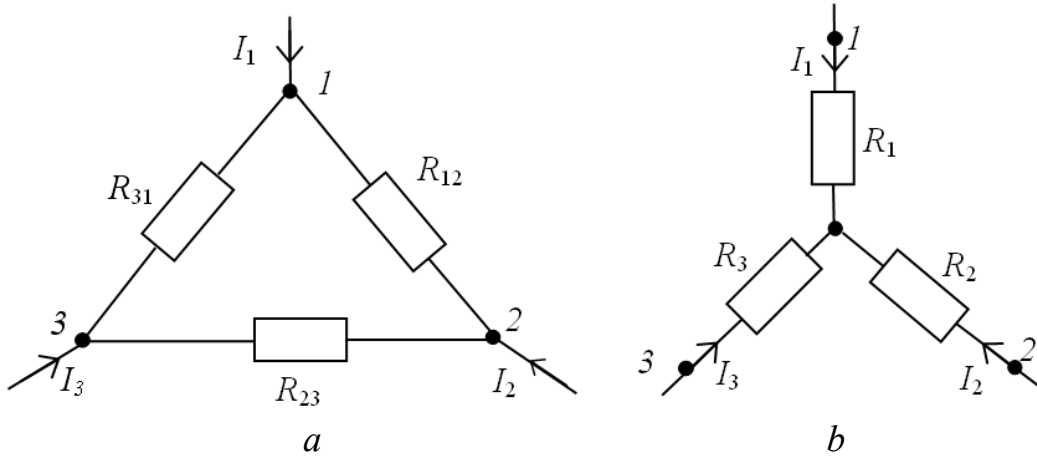
En cas de rupture de fil connecté au noeud 1, la tension entre les noeuds 2 et 3, ainsi que les courants des fils connectés à ces noeuds, doivent être identiques dans les schémas du triangle et d'étoile. Donc, les résistances entre les noeuds 2 et 3 des schémas du triangle et d'étoile doivent être égales entre eux-mêmes. Dans le schéma de l'étoile (fig. 2.10) le courant ne passe pas par la résistance  $R_1$ . C'est pourquoi entre les noeuds 2 et 3 on insère une section, comprenant deux rayons de l'étoile successivement connectés, dont la résistance totale est égale  $R_2 + R_3$ .

Dans le schéma du triangle (fig. 2.11, *a*) entre les noeuds 2 et 3 il y a deux branches parallèles, dont l'une est incluse résistance  $R_{23}$ , dans l'autre – deux résistance connectés en série  $R_{31}$  et  $R_{12}$ . La résistance totale du circuit

$$\frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}.$$

De la condition d'équivalence

$$R_2 + R_3 = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}. \quad (2.63)$$



**Figure 2.11** – Couplages équivalentes des résistances en triangle (a) et en étoile (b)

En répétant les raisonnements cités ci-dessus pour le cas, quand se détache le fil connecté au noeud 2, et puis au noeud 3, nous recevons encore deux équations :

$$R_3 + R_1 = \frac{R_{31}(R_{12} + R_{23})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}, \quad (2.64)$$

$$R_1 + R_2 = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}. \quad (2.65)$$

En résolvant le système de trois équations (2.63) – (2.65) relativement des résistances de l'étoile, nous trouvons :

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (2.66)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (2.67)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{32}}. \quad (2.68)$$

Donc, *la résistance de rayon de l'étoile équivalente est égale au produit des résistances des côtés d'un triangle adhérent au rayon, divisé par la somme des résistances de tous côtés d'un triangle.*

En cas de l'égalité des résistances des côtés d'un triangle  $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$  les résistances des rayons de l'étoile équivalente  $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$  seront à trois fois moins de résistances des côtés d'un triangle :  $R_Y = R_{\Delta}/3$ .

Au remplacement de l'étoile par le triangle équivalent la résistance du triangle  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  on peut définir selon les résistances connues de l'étoile  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , en résolvant le système d'équations (2.66), (2.67) et (2.68) relativement  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ . Pour ce faire, nous multiplierons par paires (2.66) sur (2.67), (2.67) sur (2.68), (2.68) sur (2.66), nous ajoutons ces oeuvres et nous passerons les transformations correspondantes. Finalement nous recevons :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} ; \\ R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} ; \\ R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} . \end{array} \right. \quad (2.69)$$

À partir des formules reçues, on voit que ***la résistance de quelque partie du triangle équivalent est égale à la somme des résistances des rayons de l'étoile adhérent à ce côté du triangle et la fraction, dont le numérateur est égal à l'oeuvre des résistances de ces rayons, et le dénominateur – à la résistance du troisième rayon de l'étoile.***

## 2.7 Lois de Kirchhoff

Dans la théorie des circuits électriques l'importante signification ont les lois établis expérimentalement en 1845 par le physicien allemand Gustav Robert Kirchhoff. Ces lois ont reçu le nom – 1-ère et 2-ème lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles).

**2.7.1 Première loi de Kirchhoff (loi des nœuds).** Cette loi se rapporte aux noeuds de la chaîne et en cas des courants continus est formulé comme il suit: ***la somme algébrique des intensités des courants qui convergent dans un noeud, est égale à zéro***

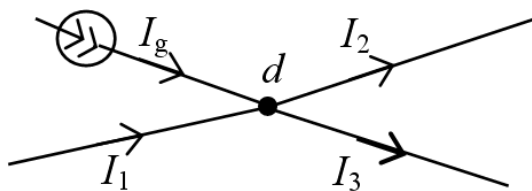
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 . \quad (2.70)$$

À l'inscription des équations de la première loi de Kirchhoff la sommation des courants s'effectue algébriquement: aux courants dirigés vers le noeud on s'approprie un signe, par exemple positif, et aux courants dirigés du noeud – un autre signe, par exemple négatif. C'est pourquoi on utilise souvent une autre formulation de la première loi de Kirchhoff: ***la somme des intensités des courants qui entrent en noeud, est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du même noeud.***

Si on connecte au noeud quelques générateurs du courant, la somme de leurs courants  $\sum I_g$  doit assister avec les signes correspondants dans la partie gauche de l'équation (2.70).

La première loi de Kirchhoff est une conséquence de la loi de ***conservation de la quantité de l'électricité*** [2, 3], selon laquelle, à aucun moment, les charges ne peuvent pas s'accumuler sans limite: ***la quantité d'électricité affluant vers le point donné au cours d'un certain laps de temps doit être égale à la quantité d'électricité qui quitte ce point en même temps.***

Prenons pour le schéma de la figure 2.12 les courants entrant au noeud  $d$  comme positif ( $I_g$  et  $I_1$ ), et les courants sortant du noeud – comme négatif ( $I_2$  et  $I_3$ ).



**Figure 2.12** – Schéma d'une section du réseau

Alors nous pouvons inscrire l'équation suivante d'après la première loi de Kirchhoff

$$I_g + I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (2.71)$$

que correspondra à la 1-er formulation de la première loi de Kirchhoff, ou sous la forme

$$I_g + I_1 = I_2 + I_3, \quad (2.72)$$

ce qui correspond à la 2-ème formulation de la première loi de Kirchhoff, ou peut être facilement obtenu par la conversion de rapport (2.71).

**2.7.2 Deuxième loi de Kirchhoff (loi des mailles).** Cette loi est une conséquence du principe de la conservation de l'énergie, en vertu duquel le changement de potentiel dans un circuit fermé est égale à zéro. Le changement du potentiel entre une paire de nœuds d'un tronçon de circuit est caractérisé par une différence de potentiel ou par une tension entre ses nœuds.

Lors de l'analyse d'un contour fermé sur certaines secteurs le potentiel du noeud final  $m$  de ce secteur augmente quant aux potentiel de son noeud initial  $n$  sur la valeur de la tension, si le sens du parcours est opposée au sens de la flèche de la tension et diminue si le sens du parcours et le sens de la flèche de la tension coïncident. C'est pourquoi on peut définir les changements du potentiel dans un contour fermé par la sommation des tensions en tenant compte de leurs signes. Selon la *deuxième loi de Kirchhoff la somme algébrique des différences de tensions le long d'une maille est constamment nulle* (la première formulation) :

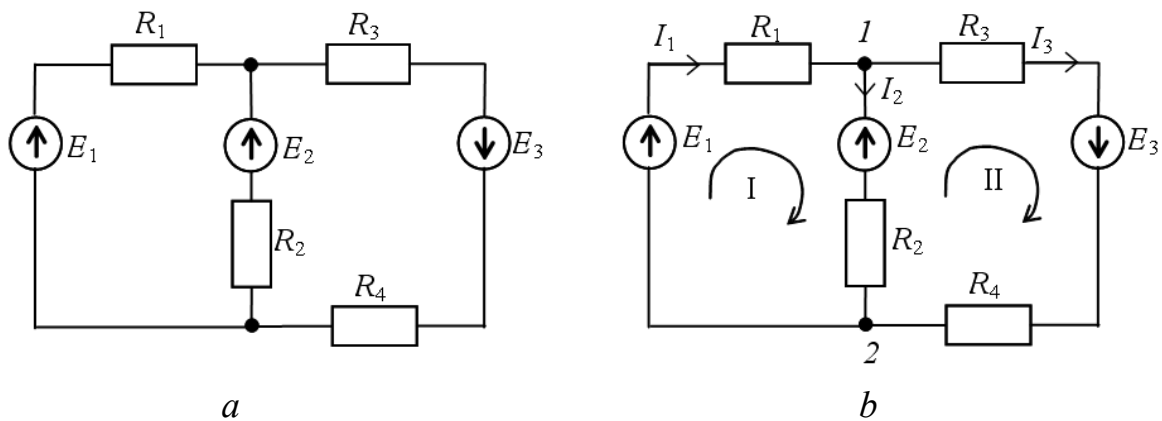
$$\sum U_{mn} = 0. \quad (2.73)$$

On est convenu que les tension dont les sens positif correspond à un parcours tracé à prendre avec les signes positifs, et les tension dont les sens positives sont opposées à la direction du parcours – avec les signes négatifs.

Conformément aux schémas du remplacement avec les sources de la *f.é.m.* la *deuxième loi de Kirchhoff* est formulée comme il suit : *la somme algébrique des tensions sur les éléments résistifs du contour fermé est égale à la somme algébrique de la f.é.m. inclus dans ce contour* (la deuxième formulation)

$$\sum I \cdot R = \sum E. \quad (2.74)$$

**2.7.3 Algorithme de l'analyse des circuits électriques.** L'application des première et deuxième lois de Kirchhoff pour l'analyse des circuits électriques permet d'effectuer le calcul de pratiquement n'importe quelle chaîne. En général, lors de l'étude on sait les forces électromotrice et les résistances de tous éléments du schéma et il faut définir les valeurs des courants et des puissances dans les branches du schéma. Nous examinerons la modalité de calcul à l'exemple du schéma de la chaîne, montré sur la figure 2.13.



**Figure 2.13** – Schéma d'une chaîne électrique : *a* – initial ;  
*b* – avec les désignations portées des noeuds, des courants  
et des sens du parcours des contours

### Algorithme de calcul

1. Sur le schéma initial de façon arbitraire nous portons les directions des courants dans les branches (fig. 2.13, *b*, les courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$ ). Si la branche a une f.é.m., la direction du courant est mieux donner coïncidant à la direction de cette f.é.m. Nous portons les désignations des noeuds (les noeuds 1 et 2 sur la figure 2.13, *b*).

2. Déterminons **le nombre des noeuds  $n$ , des branches  $m$  et des contours indépendants  $k$ .**

**On appellent un contour indépendant s'il** comprend au moins une nouvelle branche. Le nombre des contours indépendants est égal à  $k = m - (n - 1)$ .

3. Pour les contours indépendants nous poserons le sens du parcours d'une manière arbitraire (sur la figure 2.13, *b* les contours *I* et *II*, le sens du parcours selon la petite aiguille).

Pour déterminer les courants inconnus des branches il est nécessaire de composer un système des équations linéaires algébriques, dont le nombre est égal au nombre des courants inconnus. En vertu de la première loi de Kirchhoff on peut composer  $n-1$  des équations indépendantes. Utiliser toutes les  $n$  équations est impossible, car l'une d'eux est nécessairement dépendante. Cela est dû fait que les courants des branches entrent dans les équations précédentes, établis pour tous les  $n$  noeuds, deux fois et avec des signes différents, car le même courant est dirigé d'un noeud (a dans l'équation le signe négatif) vers un autre noeud (a le signe plus). À l'addition de toutes les équations les parties gauche et droite seront égales à zéro, ce qui signifie que l'on peut recevoir une des équations par la sommation  $n-1$  des équations et par le remplacement des signes de tous les courants sur les signes opposés. Ainsi, l'équation  $n$  sera toujours dépendante et donc on ne peut pas l'utiliser pour la définition des courants.

4. Établissons le nombre des équations indépendantes d'après la première loi de Kirchhoff et inscrivons ces équations.

5. Les équations manquant nous recevons de la deuxième loi de Kirchhoff. Nombre d'équations établies par la deuxième loi de Kirchhoff, doit être égal au nombre de contours indépendants  $k$ .

6. Résoudrons le système reçu des équations linéaires algébriques relativement aux courants inconnus dans les branches.

7. Vérifions l'exactitude de calcul des valeurs de courants en écrivant l'équation de la balance des puissances des sources et des récepteurs de l'énergie électrique

$$\Sigma E \cdot I = \Sigma I^2 \cdot R, \quad (2.75)$$

dans lequel la partie droite caractérise puissance des récepteurs de l'énergie électrique, et la partie gauche – la puissance des éléments actifs de la chaîne. Lors de l'élaboration de l'équation de bilan énergétique il faut prendre en compte que dans sa gauche partie avec le signe plus sont enregistrés les éléments pour lesquels le sens de la f.é.m. et du courant sont identiques. Si le sens de la f.é.m. et du courant sont à l'opposé (fonctionnement de la source dans le mode de consommation de l'énergie électrique), les nombres correspondants s'inscrivent avec le signe le moins dans la partie gauche de l'équation ou avec le signe plus dans sa partie droite qui correspond à la puissance active du récepteur de l'énergie électrique.

Le schéma de la chaîne électrique (fig. 2.13, *a*) contient deux noeuds ( $n = 2$ ), trois branches ( $m = 3$ ) et deux contours indépendants

$$k = m - (n - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

D'après la première loi de Kirchhoff nous pouvons composer une équation

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.76)$$

D'après la deuxième loi de Kirchhoff il faut composer deux équations pour deux contours indépendants (sur la figure 2.13, *b* les contours I et II). En tenant compte des sens acceptés du parcours des contours, ces équations :

pour le premier contour

$$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2; \quad (2.77)$$

pour le deuxième contour

$$-R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3 = E_2 + E_3. \quad (2.78)$$

Lors de l'élaboration des équations de (2.77), (2.78) avec un signe plus écrivons ces termes dans lesquels le courant et la force électromotrice ont les sens coïncidant avec un parcours tracé.

En résolvant le système d'équations (2.76), (2.77) et (2.78), on peut définir les courants inconnus (trois équations, trois inconnus  $I_1, I_2, I_3$ ). Si à la suite de la résolution de ces équations on obtient les valeurs négatives des courants, cela signifie que les sens véritables des courants dans les branches de la chaîne sont opposées aux sens acceptées par nous sur la figure 2.13, *b*.

Nous écrivons l'équation de la balance des puissances et nous vérifions la solution du système d'équations. Pour notre cas (fig. 2.13, *b*) nous avons l'équation de la balance des puissances

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_2 + R_4).$$

La marge d'erreur dans les calculs de génie estimée en  $2 \div 5 \%$  pour la plupart des cas est considérée comme satisfaisante.

## Conclusions principales

1. Conformément à la loi d'Ohm, le courant d'un tronçon de circuit électrique est directement proportionnel à la tension appliquée et inversement proportionnel à la résistance de ce tronçon.

2. Plus la différence des potentiels aux bornes du tronçon de la chaîne, plus l'intensité du courant à la valeur donnée de la résistance de la chaîne.

3. Résistance complète de la chaîne électrique représente la somme des résistances de charge, de ligne et de la résistance interne de source d'alimentation.

4. Sous régime à vide on comprend fonctionnement d'une source d'énergie électrique à la charge déconnectée.

5. Le régime de court-circuit d'une source a lieu quand la valeur de la résistance de charge est pratiquement égale à zéro

6. Le régime nominal d'une source se caractérise par ce que la tension, le courant et la puissance de la source correspondent aux valeurs calculés par la fabrication.

7. Pour améliorer la stabilité de la tension aux bornes d'un consommateur il faut baisser la résistance intérieure de la source.

8. Pour obtenir un rendement élevé d'un source d'énergie électrique la résistance du consommateur doit plusieurs fois excéder la résistance intérieure de la source.

9. La puissance d'un circuit externe est maximale quand la résistance du circuit extérieur est égale à la résistance interne de la source.

10. Les récepteurs connectés en série avec les mêmes tensions nominales ont les meilleures conditions de travail pour les mêmes puissances nominales.

11. Le travail que réalise le courant électrique sur la section de la chaîne est directement proportionnel à la chute de potentiel sur cette section, à l'intensité du courant et au temps du passage de ce courant.

12. La puissance électrique – c'est le travail effectué par le courant électrique à l'unité de temps

13. Connexion en série – c'est une telle liaison à laquelle dans chacun des éléments passe le même courant.

14. La puissance de la chaîne, composée de branches parallèles, est égale à la somme des puissances de ses branches séparées

15. La résistance de rayon de l'étoile équivalente est égale au produit des résistances des côtés d'un triangle adhérent au rayon, divisé par la somme des résistances de tous côtés d'un triangle.

16. La résistance de quelque partie du triangle équivalent est égale à la somme des résistances des rayons de l'étoile adhérent à ce côté du triangle et la fraction, dont le numérateur est égal à l'œuvre des résistances de ces rayons, et le dénominateur – à la résistance du troisième rayon de l'étoile.

17. La somme des intensités des courants qui entrent en nœud est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du même nœud (première loi de Kirchhoff).

18. La somme algébrique des différences de tensions le longe d'une maille est constamment nulle (deuxième loi de Kirchhoff).

19. Le nombre d'équations indépendantes composées de la première loi de Kirchhoff pour la chaîne arbitraire est égal au nombre de nœuds de la chaîne moins un.



20. Le nombre des équations indépendantes établies par la deuxième loi de Kirchhoff pour la chaîne arbitraire est égal au nombre de contours indépendants de la chaîne.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Comment on formule la loi d'Ohm pour l'ensemble de la chaîne ?
2. Comment on formule la loi d'Ohm généralisée pour la section active de la chaîne électrique ?
3. Expliquez la signification physique de la notion « la chute de tension » ?
4. Comment calculer la valeur de la résistance du circuit ?
5. Expliquez la dépendance de la tension aux bornes de la source d'énergie électrique de la charge. Pourquoi lors de la modification de la charge la tension aux bornes du consommateur varie ?
6. Dans quels modes peut fonctionner une source d'énergie électrique ? Quelles sont les particularités de ces modes ?
7. Quelle est la tension à vide aux bornes de la source et pourquoi elle est réduite lors de la fermeture de la chaîne de charge ?
8. Expliquez pourquoi en mode de court-circuit la tension aux bornes de la source d'énergie électrique est égale à zéro ?
9. Quelles sont les principales caractéristiques nominales d'une installation électrotechnique ? D'une source d'énergie électrique ?
10. Comment est calculé le travail et la puissance du courant électrique ?
11. Donner la définition de la puissance complète, utile et des pertes.
12. Notez les relations de base pour déterminer le rendement du circuit électrique.
13. Expliquez loi de Joule-Lentz.
14. À quelle condition la source rend à la chaîne extérieure la puissance maximale ? Expliquez pourquoi ?
15. Expliquez que représente la connexion des éléments de la chaîne en série et quelles sont ses propriétés générales ?
16. Expliquez que représente la connexion des éléments de la chaîne en parallèle et quelles sont ses propriétés générales ?
17. Expliquez en quoi consiste la méthode des transformations équivalentes des schémas électriques ?
18. Notez les formules de transformation équivalent étoile vers triangle et triangle vers étoile.
19. Expliquez la signification physique de la première loi de Kirchhoff.
20. Expliquez la signification physique de la deuxième loi de Kirchhoff.
21. Combien des équations indépendantes de la première (de la deuxième) loi de Kirchhoff on peut composer pour un schéma de la configuration arbitraire ?
22. Expliquez l'algorithme de calcul des courants inconnus au schéma de la configuration arbitraire.
23. Comment on détermine le sens des courants dans un circuit fermé ?
24. Quel est le but de composer l'équation de l'équilibre de la puissance ?

### Chapitre 3 :

## MÉTHODES DE CALCUL DES CIRCUITS COMPLEXES À COURANT CONTINU

**Notions clés :** courant de maille,  $m$  ; méthode des courants de maille,  $f$  ; résistance propre du contour,  $f$  ; méthode nodale (des potentiels de nœud),  $f$  ; méthode des courants de maille,  $f$  ; principe de superposition,  $m$  ; méthode de superposition,  $f$  ; principe de la réciprocité,  $m$  ; méthode du générateur équivalent (du dipôle actif),  $f$ .

L'exemple classique de calcul des chaînes complexes est l'application directe de la loi de l'Ohm et les lois de Kirchhoff. Cependant en cas des chaînes fortement ramifiées il faut calculer le système avec un grand nombre des équations, donc il est naturelle de trouver les méthodes de calcul des circuits de moins fastidieux. Pour simplifier les calculs on utilise des méthodes différentes: la méthode nodale, des courants de maille, de superposition, du générateur équivalent et d'autres. Toutes ces méthodes sont basées sur les lois d'Ohm et de Kirchhoff.

Le choix de la méthode de calcul du schéma complexe dépend des données se trouvant initiales, de la structure du réseau étudié et des objectifs de son étude. À ce sujet on examine les méthodes principales du calcul des chaînes complexes du courant continu.

### 3.1 L'application des lois de Kirchhoff pour l'analyse des chaînes complexes

Nous examinerons l'application des lois de Kirchhoff pour la définition des courants des branches du schéma de la chaîne (fig. 3.1), si la f.é.m. et les résistances de ses éléments sont données.

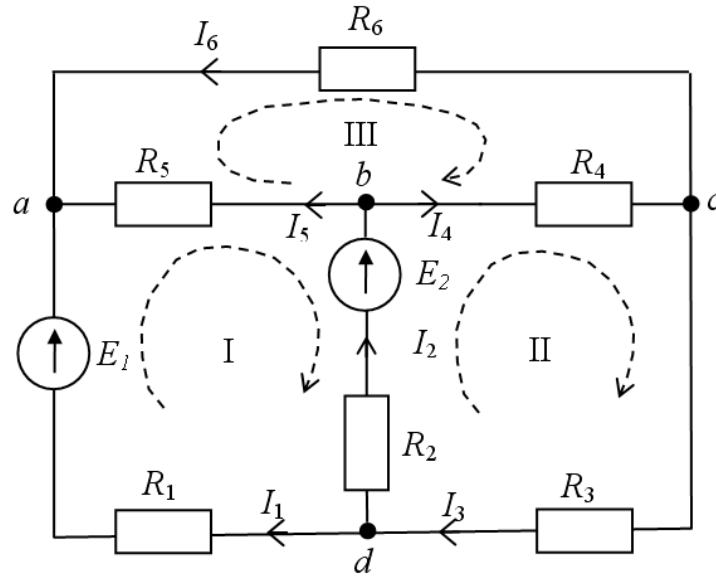
Le nombre des courants inconnus du schéma est égal au nombre  $m$  de ses branches. C'est pourquoi pour la décision de la tâche il est nécessaire de faire d'établir un système comprenant de  $m = 6$  équations indépendantes.

Supposons que le schéma a  $n$  des nœuds. Dans le schéma donné (fig. 3.1)  $n = 4$ . Choisissons arbitrairement les sens des courants des branches du schéma. Nous conviendrons que les courants dirigés vers les nœuds, ont le signe « plus », et les courants qui quittent les nœuds – le signe « moins ». D'après la première loi de Kirchhoff on peut composer  $n-1=3$  des équations indépendantes. Ayant choisi les nœuds  $b$ ,  $c$  et  $d$  comme les nœuds indépendants, on peut composer le système d'équations suivant :

$$\begin{array}{l} \text{pour le nœud } b : \\ \text{pour le nœud } c : \\ \text{pour le nœud } d : \end{array} \left\{ \begin{array}{l} I_2 - I_4 - I_5 = 0, \\ I_4 - I_6 - I_3 = 0, \\ I_3 - I_1 - I_2 = 0. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Puisque le nombre des branches  $m$  est toujours plus grand que le nombre des nœuds  $n$ , **on peut composer le nombre manquant des équations  $m - (n - 1)$ , en se servant de la deuxième loi de Kirchhoff.** Pour chacune des équations obtenu soit indépendan des équations précédentes, il faut tout le schéma diviser aux mailles indépendantes. Il faut commencer la division par le choix de la maille

la plus simple (avec le plus petit nombre des branches), et puis suivre pour que chaque maille suivante soit indépendante des mailles précédentes, pour quoi quand même une branche qui n'est pas entrée dans les mailles examinées jusqu'à cela doit y entrer.



**Figure 3.1** – Schéma de la chaîne complexe pour la définition des courants des branches d'après les lois de Kirchhoff

Nous choisirons trois mailles indépendantes, comme est indiqué sur le schéma (fig. 3.1), et nous accepterons le tour des mailles dans le sens d'une aiguille. Alors d'après la deuxième loi de Kirchhoff, nous recevrons :

$$\begin{aligned} \text{pour la maille I :} & \quad R_1 \cdot I_1 - R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2, \\ \text{pour la maille II :} & \quad R_2 \cdot I_2 + R_4 \cdot I_4 + R_3 \cdot I_3 = E_2, \\ \text{pour la maille III :} & \quad R_5 \cdot I_5 - R_6 \cdot I_6 - R_4 \cdot I_4 = 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Les équations (3.1) et les équations (3.2) donnent un système des équations linéaires algébriques

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} 0 & +I_2 & +0 & -I_4 & -I_5 & +0 & = & 0 \\ 0 & +0 & -I_3 & +I_4 & +0 & -I_6 & = & 0 \\ -I_1 & -I_2 & +I_3 & +0 & +0 & +0 & = & 0 \\ R_1 I_1 & -R_2 I_2 & +0 & +0 & -R_5 I_5 & +0 & = & E_1 - E_2 \\ 0 & +R_2 I_2 & +R_3 I_3 & +R_4 I_4 & +0 & +0 & = & E_2 \\ 0 & +0 & +0 & -R_4 I_4 & +R_5 I_5 & -R_6 I_6 & = & 0 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

dont la décision donne les valeurs des courants dans les branches du schéma.

Comme nous avons marqué dans le chapitre 2.7.3, si à la décision des équations les courants des certains sections résultent négatif, cela signifiera que leur sens exact est opposé à celui qui a été adopté avant le calcul du schéma étudié.

Nous examinerons la solution de la tâche de calcul du régime d'un réseau dans le cas total quand le schéma du remplacement de la chaîne a  $n$  nœuds et  $m$  branches, dont  $m_j$  des branches contiennent les sources de courant. Quand les f.é.m. et les résistances des branches sont donnés le calcul se résume à trouver les courants des  $m$  branches.

Nous examinerons d'abord le mode de calcul du réseau pour le schéma sans sources du courant. Comme il a déjà été mentionné, pour la décision de cette tâche il est nécessaire d'établir  $n-1$  des équations indépendantes d'après la première loi de Kirchhoff et  $k=m-(n-1)$  des équations indépendantes d'après la deuxième loi de Kirchhoff. Le système obtenu des équations linéaires algébriques sous forme matricielle s'écrit

$$\mathbf{A} \mathbf{I} = \mathbf{C}, \quad (3.4)$$

avec :

$\mathbf{A}$  – matrice des coefficients du système ;

$\mathbf{I}$  – matrice-colonne des courants inconnus du système ;

$\mathbf{C}$  – matrice-colonne de la partie droite du système.

Pour le système (3.3) matrices  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{I}$  et  $\mathbf{C}$  prennent la forme

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_2 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_4 & R_5 & -R_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 - E_2 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Pour trouver la résolution du système des équations algébriques (3.4) pour les chaînes complexes on utilise les méthodes numériques sur le PC à l'aide des paquets d'application, par exemple MATLAB ou MATCAD.

Lors du calcul des schémas avec les sources du courant l'ordre du système à résoudre diminue. Puisque les courants des branches  $m_j$  sont connus, le nombre des mailles indépendantes (sans sources du courant), pour lesquelles il convient d'établir l'équation d'après la deuxième loi de Kirchhoff, est égal courants des branches à  $k = m - m_j - (n - 1)$ .

### 3.2 Méthode nodale

La méthode nodale (appelé encore – des potentiels de nœud) permet de diminuer le nombre des équations à résoudre en ensemble jusqu'à  $n-1$ , où  $n$  – le nombre de nœuds du schéma du remplacement du réseau. La méthode est fondée sur l'application de la première loi de Kirchhoff et consiste en suivant.

1. Un des nœuds du schéma du remplacement on accepte comme le nœud de base avec le potentiel nul. Une telle admission ne change pas la signification des courants dans les branches, puisque le courant dans chaque branche dépend seulement de la différence des potentiels des nœuds, et non pas de la valeur réelle de ces potentiels.

2. Pour les autres  $n - 1$  nœuds on compose le système des équations par la première loi de Kirchhoff, en exprimant les courants dans les branches par les potentiels des nœuds.

3. Par la solution du système obtenu on définit les potentiels de  $n-1$  nœuds relativement de potentiel du nœud de base, et puis on trouve les courants des branches d'après la loi d'Ohm généralisée (2.18).

Nous examinerons l'application de la méthode des potentiels de nœud à l'exemple du schéma de circuit (voir fig. 3.2), contenant  $n = 3$  nœuds. Le nœud 3 nous acceptons comme le nœud de base, i.e.  $\varphi_3 = 0$ . Pour les nœuds 1 et 2 nous établissons les équations d'après la première loi de Kirchhoff.

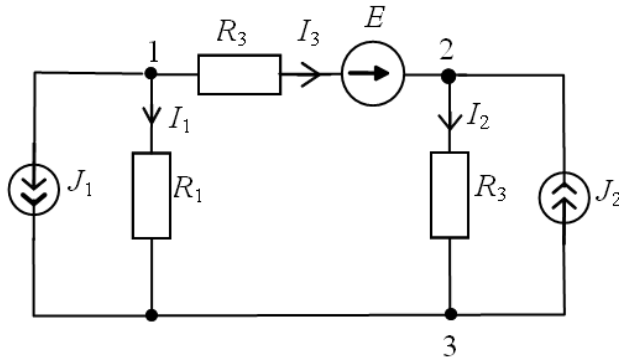


Figure 3.2 – Schéma de calcul

Pour le nœud 1

$$I_1 + I_3 + J_1 = 0 ,$$

pour le nœud 2

$$I_2 - I_3 - J_2 = 0 ,$$

avec :

$$I_1 = (\varphi_1 - \varphi_3)/R_1 = \varphi_1/R_1 ;$$

$$I_2 = (\varphi_2 - \varphi_3)/R_2 = \varphi_2/R_2 ;$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E)/R_3 .$$

Après la substitution des valeurs reçues des courants aux équations pour 1-ère et 2-ème nœuds nous recevrons un système d'équations

$$\begin{cases} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \varphi_1 - \frac{1}{R_3} \varphi_2 = -J_1 - \frac{E}{R_3} , \\ -\frac{1}{R_3} + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \varphi_2 = J_2 + \frac{E}{R_3} . \end{cases} \quad (3.5)$$

La notation matricielle de ce système

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -\frac{E}{R_3} \\ J_2 & \frac{E}{R_3} \end{bmatrix} . \quad (3.6)$$

Ou dans la notation plus commode

$$\begin{bmatrix} G_{11} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -G_3 E \\ J_2 & G_3 E \end{bmatrix} , \quad (3.7)$$

où :

$G_{11}$  et  $G_{22}$  – **conductibilité propre** des nœuds 1 et 2, qui sont définis comme la somme des conductibilités de branches connectées en conséquence aux nœuds 1 et 2 ;  
 $G_{12}$  et  $G_{21}$  – **conductibilité mutuel** des nœuds 1 et 2 (la conductibilité de la branche, joignant les nœuds 1 et 2) ;

$G_3$  – conductibilité de la branche dont la f.é.m. est  $E$  (dans notre cas  $G_{12} = G_3$ ).

Notons que la première équation du système (3.7) est inscrite par rapport au nœud 1, et la deuxième – en par rapport au nœud 2. La partie droite du système contient les courants des nœuds, définis comme la somme algébrique des courants des branches avec les sources de courants et les courants du court-circuit des branches avec les sources de la f.é.m., convergeant vers le nœud examiné, et en outre les nombres à additionner sont prises avec le signe plus (moins), si le courant de la source et la f.é.m. entrent dans le nœud examiné (quittent le nœud).

Dans le cas général le système (3.7) prend la forme

$$\mathbf{G}_{ik} \varphi_k = \mathbf{I}_{yi} , \text{ avec } i, k = \overline{1, m - m_j - 1} , \quad (3.8)$$

où :

$\mathbf{G}_{ik}$  – matrice des conductibilité propre et mutuel des nœuds ;

$\Phi_k$  – matrice-colonne des potentiels cherchés des nœuds ;

$I_{yi}$  – matrice-colonne des courants des nœuds.

La méthode des potentiels de nœud est plus effective que la méthode des courants de maille au cas où le nombre des nœuds dans le schéma est moins ou égale au nombre des mailles indépendants. Il est particulièrement effectif lors du calcul des circuits électriques avec deux nœuds et grand nombre de branches parallèles. Dans ce cas, si l'on prend le potentiel d'un des nœuds égal à zéro, par exemple  $\varphi_2 = 0$ , alors la tension entre les nœuds sera égale au potentiel de l'autre nœud

$$U_{12} = \varphi_1 = I_{y1}/G_{11} = \frac{\sum_{k=1}^m E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}, \quad (3.9)$$

où :

$n$  – nombre des branches parallèles de la chaîne ;

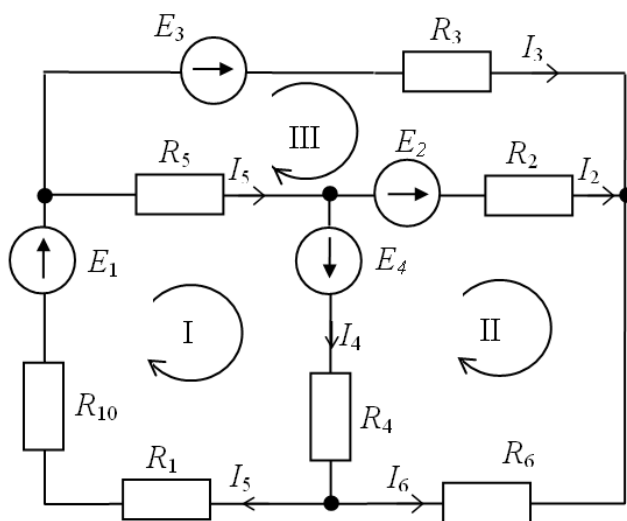
$m$  – nombre des branches contenant les sources de la f.é.m.

Dans certains cas, la méthode des potentiels de nœud est appelée la méthode nodale de la tension et en cas particulier pour deux nœuds – la méthode de la tension de nœud.

### 3.3 Méthode des courants de maille

L'une des méthodes largement répandues est la méthode des courants de maille. Elle permet de diminuer le nombre total  $m$  des équations à résoudre à  $(n - 1)$  et de réduire le système au nombre des équations  $k = m - (n - 1)$  faites d'après la deuxième loi de Kirchhoff.

À la base de cette méthode on mis la notion *des courants de maille*, sous lesquels on comprennent *les courants de calcul (conventionnels) se renfermant seulement par ses propres mailles*.



**Figure 3.3** – Schéma de la chaîne complexe pour la définition des courants par la méthode des courants de maille

Nous examinerons, à titre d'exemple, le schéma d'un circuit (fig. 3.3). Nous la découpons à trois mailles contiguës et nous conviendrons que, par chacun d'entre eux passe son courant de maille  $I_1, I_2, I_3$ . Le sens des courants dans tous les mailles choisissons identique – selon la petite aiguille, comme c'est indiqué sur le schéma (fig. 3.3). En comparant les sens des courants des mailles aux courants des branches, dont la destination est également appliqué sur le schéma, on peut établir que les valeurs des courants des mailles coïncident avec les valeurs des

courants des branches seulement dans les branches extérieures :

$$I_I = I_1, \quad I_{II} = -I_6, \quad I_{III} = I_3. \quad (3.10)$$

Les courants des branches contiguës sont égaux à la différence des courants des mailles voisines :

$$\begin{aligned} I_2 &= I_{II} - I_{III}, \\ I_4 &= I_I - I_{II}, \\ I_5 &= I_{III} - I_I. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Donc, selon les courants des mailles connus du schéma on peut définir facilement les courants valables de ses branches.

Pour définir les courants des mailles de ce schéma il suffit de composer seulement trois équations pour chacun des mailles :

$$\begin{aligned} \text{pour la maille I : } & (R_1 + R_{10} + R_5 + R_4) \cdot I_I - R_4 \cdot I_{II} - R_5 \cdot I_{III} = E_1 + E_4; \\ \text{pour la maille II : } & (R_2 + R_6 + R_4) \cdot I_{II} - R_4 \cdot I_I - R_2 \cdot I_{III} = E_2 - E_4; \\ \text{pour la maille III : } & (R_2 + R_5 + R_3) \cdot I_{III} - R_5 \cdot I_I - R_2 \cdot I_{II} = E_3 - E_2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

En résolvant le système reçu (3.12), nous définirons les courants des mailles, et par eux – les courants valables des branches.

On utilise souvent la méthode des courants de maille pour la preuve des autres méthodes possibles de calcul et pour l'analyse des chaînes en vue générale. Dans ce cas les équations faites pour les courants des mailles inscrivent dans l'aspect généralisé. ***La résistance totale d'une maille on désigne par deux indices inférieurs indiquant le numéro de la maille, et on l'appellent – résistance propre de la maille.***

Ainsi, les résistances propres de trois mailles du schéma (fig 3.3) sont égales

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_{10} + R_5 + R_4; \\ R_{22} &= R_2 + R_6 + R_4; \\ R_{33} &= R_2 + R_5 + R_3. \end{aligned} \quad (3.13)$$

On examine ***les résistances communes des mailles contiguës*** comme les coefficients des courants et désigne par deux indices inférieurs indiquant, entre quels mailles contiguës est inséré cette résistance. Ainsi, par exemple, pour le schéma examiné (fig 3.3)

$$R_{12} = R_4, \quad R_{13} = R_5, \quad R_{23} = R_2. \quad (3.14)$$

En prenant en compte ces désignations, on peut recopier les équations (3.12) de la façon suivante :

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_I - R_{12} \cdot I_{II} - R_{13} \cdot I_{III} = E_I; \\ -R_{21} \cdot I_I + R_{22} \cdot I_{II} - R_{23} \cdot I_{III} = E_{II}; \\ -R_{31} \cdot I_I - R_{32} \cdot I_{II} + R_{33} \cdot I_{III} = E_{III}. \end{cases} \quad (3.15)$$

Les f.é.m. dans ces équations

$$E_I = E_1 + E_4, \quad E_{II} = E_2 - E_4 \quad \text{et} \quad E_{III} = E_3 - E_2, \quad (3.16)$$

sont les f.é.m. des mailles, dont les valeurs on définit par la sommation algébrique des f.é.m. des branches du contour donné. De plus les f.é.m. coïncidant avec le sens du courant de maille, additionne avec le signe « plus ».

Les équations (3.15) s'expriment sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} R_{11} & -R_{12} & -R_{13} \\ -R_{21} & R_{22} & -R_{23} \\ -R_{31} & -R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_I \\ E_{II} \\ E_{III} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

dont les coefficients de la vecteur-colonne des f.é.m. des mailles sont définis par les rapports (3.16). En façon générale, pour le schéma de la configuration arbitraire le système des équations des courants des mailles s'expriment par

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}, \quad (3.18)$$

avec :

$\mathbf{R}$  – matrice carrée des coefficients aux courants inconnus des mailles ;

$\mathbf{I}$  – vecteur-colonne des courants inconnus des mailles ;

$\mathbf{E}$  – vecteur-colonne des f.é.m. des mailles.

La solution du système des équations (3.18) a la forme

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{E}, \quad (3.19)$$

où  $\mathbf{R}^{-1}$  – matrice inverse à la matrice des coefficients  $\mathbf{R}$ .

### 3.4. Principe de superposition

Le principe de superposition est un des principes fondamentaux de la physique, qui est utilisé lors de l'examen des phénomènes apparaissant sous l'effet de plusieurs causes. Selon ce principe on subdivise les phénomènes complexes en plus simples, dans lesquels chacune des causes en particulier agit indépendamment des autres, et les résultats de ces influences (les réponses), en s'imposant un sur l'autre, forment la réaction totale. Par exemple, en l'électrostatique l'intensité du champ dans quelque point de quelques charges de points est déterminée à la base du principe de superposition comme la somme géométrique des tensions du champs des charges de points agissant indépendamment l'un de l'autre, et le potentiel du point de ce champ – comme le résultat de l'imposition (la sommation algébrique) les potentiels de chacun des charges en particulier. Dans la mécanique le principe de superposition est considérée comme le principe de l'action indépendante des forces.

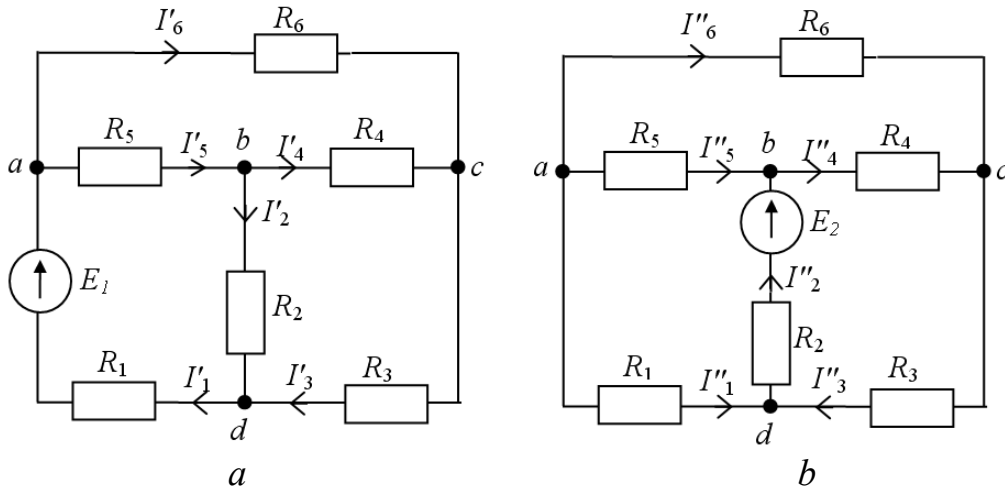
Conformément aux chaînes électriques **le principe de superposition** consiste en ce que *l'on peut examiner l'influence de quelques sources sur un certain élément de la chaîne comme le résultat de la sommation des influences sur cet élément de chacun de la f.é.m. de la source en particulier indépendamment des autres.*

Le principe de superposition est utilisé pour remplacer le résultat de l'influence d'une f.é.m. de la forme complexe par le résultat de l'influence des plus simples composantes de cette f.é.m.

**La méthode de calcul d'un réseau électrique utilisant le principe de superposition on appellent la méthode de superposition.** À l'aide de cette méthode calcul d'une chaîne complexe de plusieurs f.é.m. on réduise au calcul de plusieurs circuits avec une seule alimentation. On examine le courant dans n'importe quelle branche comme le résultat de l'imposition des courants résultant des f.é.m. séparées, agissant indépendamment l'un de l'autre.



Nous examinerons les modalités de calcul de la méthode de superposition à l'exemple du schéma (fig. 3.1). Pour définir les courants des branches d'abord nous estimons que dans le schéma agit seulement f.é.m.  $E_1$ . De plus toutes les résistances, y compris les résistances intérieures des sources, nous supposons invariable. La définition des courants partiels  $I'_1, I'_2, \dots, I'_6$  des branches résultant de la f.é.m.  $E_1$  est réduit à la calcul du schéma de la chaîne présenté sur la figure 3.4, *a*. Ensuite nous répétons le calcul alternativement pour toute une autre f.é.m. Dans notre cas pour la f.é.m.  $E_2$ , à partir du schéma de la chaîne (fig. 3.4, *b*) nous définirons les courants partiels  $I''_1, I''_2, \dots, I''_6$ .



**Figure 3.4** – Schémas de la chaîne à définir les courants au moyen de la méthode de superposition des f.é.m.  $E_1(a)$  и  $E_2(b)$

La sommation algébrique des courants partiels donne la signification valables des courants des branches, dont les sens positifs doivent être préalablement déposés sur le schéma initial (voir la figure 3.1).

Compte tenu les sens des courants partiels et résultants, nous recevrons :

$$\begin{cases} I_1 = I'_1 - I''_1, \\ I_2 = -I'_2 + I''_2, \\ \dots \dots \dots \\ I_6 = -I'_6 + I''_6. \end{cases} \quad (3.20)$$

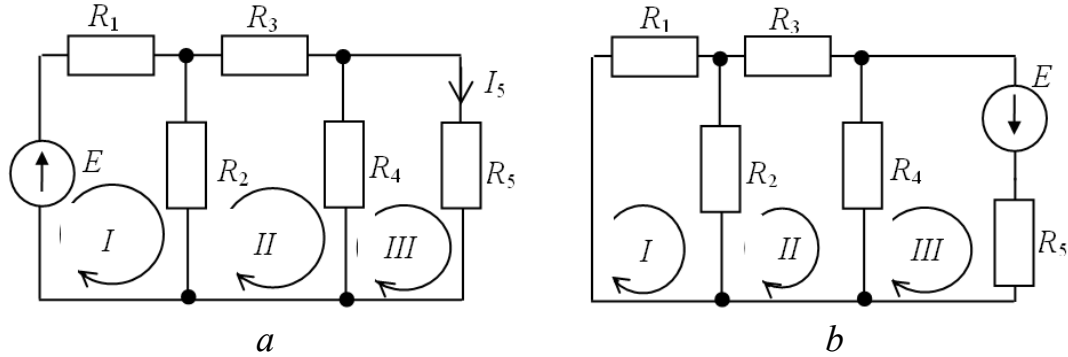
Le nombre des composants dans le système (3.20) est égal au nombre de la f.é.m. du schéma.

Il faut noter que la méthode de superposition ne s'applique pas au calcul des puissances, par ce que les valeurs des derniers sont proportionnelles aux carrés des courants.

### 3.5 Principe de réciprocité

Les chaînes électriques linéaires du courant continu avec une source d'alimentation possèdent la propriété de réciprocité (convertibilité). Elle réside dans le fait que si la f.é.m.  $E$  de la branche  $n$  de la chaîne provoque le courant  $I_k$  à la branche  $k$ , la même f.é.m., en agissant à la branche  $k$ , provoquera à la branche  $n$  le courant  $I_n$  de la même valeur  $I_n = I_k$ .

Nous examinerons le principe de réciprocité à l'exemple des schémas des chaînes de la figure 3.5, *a* et *b*. La f.é.m.  $E$  de la première branche du schéma (fig. 3.5, *a*) provoque dans la résistance  $R_5$  le courant  $I_5$  égal au troisième courant de maille  $I_{III} = I_5$ . Pour trouver le courant  $I_{III}$  à l'aide des déterminants, nous inscrirons pour chacun des mailles leur f.é.m., les résistances totales et communes.



**Figure 3.5** – Application du principe de réciprocité pour les courants  $I_5(a)$  et  $I_1(b)$

Pour la maille I :

$$E_I = E, \quad R_{11} = R_1 + R_2, \quad R_{12} = R_2, \quad R_{13} = 0.$$

Pour la maille II :

$$E_{II} = 0, \quad R_{22} = R_2 + R_3 + R_4, \quad R_{21} = R_2, \quad R_{23} = R_4.$$

Pour la maille III :

$$E_{III} = 0, \quad R_{33} = R_4 + R_5, \quad R_{32} = R_4, \quad R_{31} = 0.$$

Le courant de la troisième maille ( $k = 3$ ) provoquée par la f.é.m. du premier maille ( $n = 1$ )

$$I_3 = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{13}}{\Delta} E_I + \frac{A_{23}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{33}}{\Delta} E_{III},$$

ou bien

$$I_{III} = I_5 = \frac{A_{13}}{\Delta} E_1 = \frac{A_{13}}{\Delta} E. \quad (3.21)$$

Le déterminant du système  $\Delta$ , son mineur  $M_{13}$  et le complément algébrique  $A_{13}$  sont respectivement :

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ -r_{21} & r_{22} & -r_{23} \\ -r_{31} & -r_{32} & r_{33} \end{vmatrix}, \quad M_{13} = \begin{vmatrix} -r_{21} & r_{22} \\ -r_{31} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{21}r_{23} + r_{22}r_{31},$$

$$A_{13} = (-1)^{1+3} M_{13} = M_{13}.$$

Pour le schéma de la chaîne (fig. 3.5, *b*) les résistances complètes et communes, et, par conséquent, le déterminant  $\Delta$  restent sans changement. La f.é.m. de maille de ce schéma:  $E_I = 0$ ,  $E_{II} = 0$  et  $E_{III} = E$ . Donc le courant de la première maille ( $k = 1$ ) provoquée par la f.é.m. du troisième maille ( $k = 3$ )

$$I_{k=1} = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{11}}{\Delta} E_1 + \frac{A_{21}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III} .$$

D'où

$$I_I = \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III} = \frac{A_{31}}{\Delta} E . \quad (3.22)$$

Le mineur  $M_{31}$  est reçu du déterminant  $\Delta$  par la suppression de la troisième ligne et la première colonne :

$$M_{31} = \begin{vmatrix} -r_{12} & -r_{13} \\ r_{22} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{12}r_{23} + r_{22}r_{13} .$$

Le complément algébrique

$$A_{31} = (-1)^{3+1} M_{13} = M_{31} .$$

Les valeurs  $A_{13} = A_{31}$ . C'est pourquoi, en vertu de (3.21) et (3.22),  $I_I = I_{III} = I_5$ .

### 3.6 Méthode du générateur équivalent

Si nous avons nécessité d'étudier les modes de fonctionnement d'une des branches de la chaîne du circuit électrique complexe au changement de la résistance de cette branche, il n'y a pas besoin de produire un calcul encombrant de toute la chaîne par l'une de ces méthodes examinées plus haut. Il est plus rationnel de se servir de la méthode du générateur équivalent dit générateur de Thevenin. Selon cette méthode *on peut remplacer l'influence de toutes les sources du circuit complexe sur la branche étudiée par l'influence du générateur équivalent dont la f.é.m.  $E_{\text{équiv}}$  et la résistance intérieure  $R_{\text{équiv}}$  et qui est inclus successivement à cette branche.*

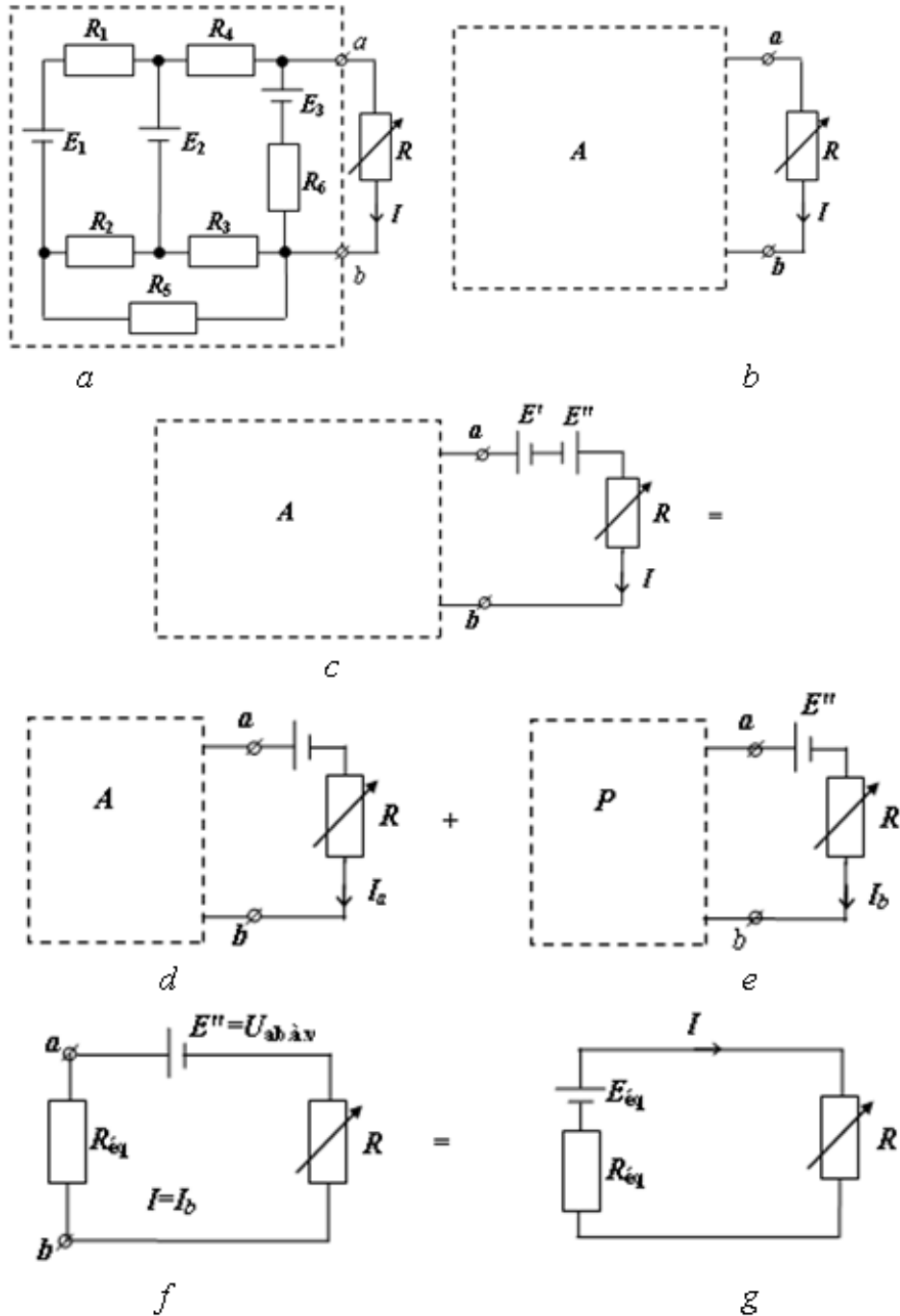
Montrons la possibilité d'un tel remplacement pour la définition du courant dans la branche qui a la résistance changeant  $R$  (voir la figure 3.6, *a*). Que les f.é.m.  $E_1, E_2, E_3$  et les résistances  $R_1, R_2, R_3$  de ce schéma soient données. Pour établir la fonction de courant de résistance  $R$  nous mettrons en relief cette branche et l'autre partie du schéma nous conclurons au rectangle pointillé, en montrant les bornes  $a$  et  $b$ , à l'aide de qui elle est associée à la branche étudiée (fig. 3.6, *b*). La partie sélectionnée du schéma ayant deux bornes, est le **dipôle actif** A. La lettre A dans le rectangle du schéma (fig. 3.6, *b*) montre que l'influence résultante des f.é.m.  $E_1, E_2$  et  $E_3$  sur la branche étudiée n'est pas égale à zéro.

Nous incluons dans la branche étudiée deux f.é.m. égal par la valeur et opposée de la sens  $E'$  et  $E''$  (fig. 3.6, *b*). Le courant de branche  $I$  de cela ne changera pas et sera égal au courant du schéma initial.

Le courant  $I$  (fig. 3.6, *c*) est examiné comme le résultat de la superposition des courants  $I_a$  (fig. 3.6, *d*) de l'action des f.é.m.  $E', E_1, E_2, E_3$  et le courant  $I_b$  (fig. 3.6, *e*) de l'action de la f.é.m.  $E''$ . Les branches de la partie du schéma (fig. 3.13, *e*), conclu au rectangle, sont passives, c'est pourquoi ils sont désignés par la lettre P.

Pour que le courant  $I$  de la branche étudiée soit égal au courant  $I_b$  (le schéma dans la figure 3.6, *e*), dans le schéma de la figure 3.6, *d* la f.é.m.  $E'$  est

choisi d'une telle valeur, à qui le courant  $I_a$  sera égal à zéro. Cette condition peut être respectée, si la f.é.m.  $E'$  est égale à la tension de marche à vide entre les bornes du schéma  $a$  et  $b$ :  $E' = U_{ab.m.à.v.}$ .



**Figure 3.6** – Schéma du réseau pour le calcul selon la méthode du générateur équivalent

La valeur de la f.é.m.  $E'$  pour ces conditions on peut définir et analytiquement. Dans ce cas pour le schéma sur la figure 3.6,  $d$  nous établissons l'équation pour le courant, en utilisant la loi de l'Ohm pour la section de la chaîne avec la f.é.m.  $E'$  et la tension  $U_{ab}$  :

$$I_a = \frac{U_{ab} - E'}{R} .$$

De cette équation on voit que lorsque le courant  $I_a$  est égal à zéro, la f.é.m.  $E'$  est égale à la tension de la marche à vide  $U_{ab.m.a.v.}$  entre les bornes  $a$  et  $b$  du schéma.

Ainsi, pour déterminer le courant  $I$  du schéma initial (fig. 3.6,  $a$ ) il suffit d'examiner seulement le schéma (fig. 3.6,  $e$ ) avec agissant en elle la f.é.m.  $E'' = E' = U_{ab.m.a.v.}$ . Ce schéma se compose de deux éléments résistifs montés en série – la résistance  $R$  de la branche étudiée et un élément résistif avec la résistance de l'autre partie de la chaîne par rapport aux bornes  $a$  et  $b$  (fig. 3.6,  $e$ ).

Pour déterminer la résistance d'entrée en ce qui concerne les bornes de la gauche partie du schéma (fig. 3.6), il est nécessaire d'accomplir les transformations des résistances du dipôle passif en la résistance équivalente égale à la résistance d'entrée  $R_{ab}$ . La séquence des transformations est illustrée à la figure 3.7. Nous définissons la résistance équivalente entre les points 1-2

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} .$$

La résistance équivalente entre les points 2-3

$$R_{23} = \frac{R_3(R_{12} + R_5)}{R_3 + R_{12} + R_5} .$$

La résistance d'entrée du schéma:

$$R_{entr} = R_{43} = \frac{R_6}{R_6 + R_4 + R_{23}} . \quad (3.23)$$

On peut présenter l'influence de la f.é.m.  $E'' = U_{ab.m.a.v.}$  à la résistance  $R$  du schéma (fig. 3.6,  $g$ ) comme l'influence d'un générateur équivalent de la f.é.m.  $E_{equiv}$  égal à la tension de marche à vide entre les bornes  $ab$ , à qui on connecte la branche étudiée :

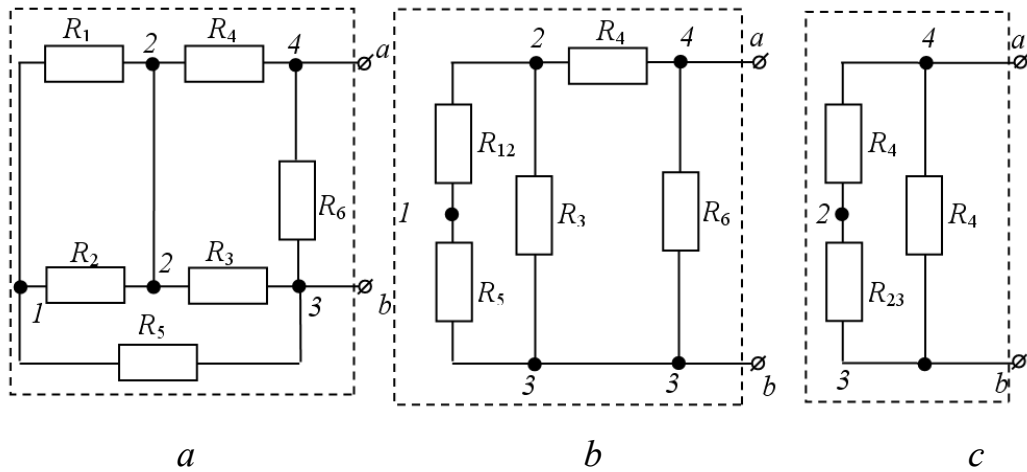
$$E_{equiv} = E'' = U_{ab.m.a.v.} . \quad (3.24)$$

La résistance interne du générateur équivalent est égale à la résistance d'entrée de l'autre partie passive de la chaîne par rapport aux bornes  $a$  et  $b$ , auxquelles on attache la branche étudiée :

$$R_{equiv} = R_{entr} \quad (3.25)$$

En connaissant la f.é.m.  $E_{equiv}$  et la résistance interne  $R_{equiv}$  du générateur équivalent (voir la figure 3.6,  $g$ ), on peut définir le courant de la branche étudiée :

$$I = E_{equiv} / (R + R_{equiv}) . \quad (3.26)$$



**Figure 3.7** – Succession de la transformation des résistances du dipôle passif

Décrite ci-dessus méthode de la définition du courant dans une branche de la chaîne complexe on appelle **la méthode du générateur équivalent ou la méthode du dipôle actif**. Il s'appelle la méthode du générateur équivalent parce que l'influence sur la branche étudiée de toute l'autre partie de la chaîne électrique est remplacée par l'influence du générateur équivalent. Comme la méthode du **dipôle actif** on l'appelle parce que par rapport à la branche étudiée l'autre partie de la chaîne, connectée à la branche étudiée avec deux bornes de sortie  $a$  et  $b$ , est appelée le dipôle. La résistance totale des branches formant le **dipôle passif** (fig. 3.6,  $e$ ) relativement aux bornes  $a$  et  $b$ , est appelée **la résistance d'entrée du dipôle**. Elle est égale à la résistance intérieure du générateur équivalent.

### Conclusions principales

1. Il y a quelques méthodes de calcul des chaînes complexes. Le choix de la méthode dépend de la configuration du schéma, des données initiales disponibles et des objectifs de l'étude des chaînes.
2. À partir des lois d'Ohm et de Kirchhoff on peut calculer n'importe quel schéma électrique. Pour les schémas de structure complexe on obtient un système avec un grand nombre d'équations.
3. La méthode des potentiels de nœud permet de réduire l'ordre du système à résoudre jusqu'à  $n-1$  équations faites d'après la première loi de Kirchhoff.
4. La méthode des courants de maille permet de réduire l'ordre du système jusqu'à  $m-n+1$  des équations faites d'après la deuxième loi de Kirchhoff. Sur la base de la méthode on met les courants calculés (conventionnels) des mailles qui se renferment dans les mailles contiguës des circuits électriques ramifiés. Les significations véritables des courants dans les branches de la chaîne on définit selon les significations des courants des mailles.
5. La méthode des potentiels de nœud est plus effective que la méthode des courants de mailles si le nombre des noeuds dans le schéma est moins ou égal au nombre des mailles indépendants.

6. On peut examiner l'influence de quelques sources d'alimentation (les f.é.m. et les tensions) sur un élément de la chaîne comme le résultat total de l'influence sur cet élément de chaque source en particulier indépendamment d'autres sources (la méthode de superposition).

7. La méthode du générateur équivalent permet dans certains cas assez simplement de définir le courant dans l'une des branches du circuit complexe et étudier la conduite de cette branche au changement de sa résistance. Dans ce cas plus par rapport à la branche étudiée le circuit complexe avec quelques sources d'alimentation est remplacée par le dipôle équivalent actif avec une source d'alimentation (le générateur équivalent) de la f.é.m.  $E_{\text{equiv}}$  et la résistance interne  $R_{\text{equiv}}$ .

8. On considère comme actif le dipôle, qui contient au moins une source de la f.é.m. ou du courant. En l'absence des sources à l'intérieur du dipôle il est considéré comme passif.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. À quoi est égal le nombre des noeuds (des mailles) indépendants dans un schéma de la configuration arbitraire ?
2. Comment choisir le noeud de base dans la méthode nodale ?
3. Combien d'équations sont faites selon la méthode des potentiels nodale ?
4. Expliquez les modalités de calcul du schéma électrique par la méthode des potentiels nodale.
5. Expliquez la notation matricielle des équations selon la méthode des potentiels nodale.
6. Expliquez les avantages de la méthode des potentiels nodale.
7. Qu'entend-on par le courant de maille ?
8. Comment on choisissent les directions du détour des contours dans la méthode des courants de maille ?
9. Expliquez la notation matricielle des équations selon la méthode des courants de maille.
10. Expliquez l'essentiel du principe de la superposition.
11. Expliquez l'essentiel du principe de la réciprocité.
12. Expliquez l'essentiel de la méthode du générateur équivalent.
13. Dans quels cas est-il préférable l'application de la méthode du générateur équivalent ?

## Dixième parti : CIRCUITS ÉLECTRIQUES À COURANT ALTERNATIF

---

### Chapitre 4 : PROCESSUS PHYSIQUES EN COURANT ALTERNATIF

**Notions clés :** courant alternatif,  $m$  ; courant alternatif périodique,  $m$  ; valeur efficace (moyenne) de la tension (de la f.é.m., du courant),  $f$  ; phase,  $f$  ; phase initiale,  $f$  ; fréquence angulaire,  $f$  ; angle du déphasage,  $m$  ; diagramme vectoriel,  $m$  ; signification complexe,  $f$  ; vecteur de la signification complexe,  $m$  .

#### 4.1 Informations de base sur le courant alternatif

Les chaînes avec les courants variables (alternatif) en comparaison des chaînes en courant continu ont une série de particularités. Ces particularités sont définies par ce que les courants et les tensions alternatives des éléments séparés des installations électrotechniques génèrent en eux les champs variables électriques et magnétiques. À la suite du changement de ces champs dans la chaîne électrique apparaissent les phénomènes de l'auto-induction, l'induction mutuelle et les courants du déplacement, qui font les influences essentielles sur les procès passant à la chaîne. L'analyse des procès dans les chaînes se complique.

On utilise largement le courant alternatif dans la technique, puisqu'il est facile de le transformer et transmettre aux grandes distances à la haute tension et sans grandes pertes. De plus, l'effet économique est immense. En outre, les machines électriques et d'autres installations électrotechniques, destinées au fonctionnement dans les chaînes du courant alternatif, sont assez simples et assez solide.

Le courant alternatif est utilisé dans différents domaines du génie électrique (commande électrique, électrothermie, télécommunications, radiotechnique, etc). Son utilisation aux entreprises de l'industrie de la construction et aux chantiers permet de réaliser efficacement de nombreux processus technologiques de l'industrie.

***Le courant électrique dont l'intensité change avec le temps est appelé le courant alternatif.*** Si les significations instantanées et le sens du courant à intervalles réguliers (périodiquement) se répètent alors on dit que le courant change périodiquement.

Les circuits électriques du courant alternatif périodique on classifie en fonction de la forme de la courbe du courant, de sa fréquence, de la nature des paramètres, de la complexité des schémas de substitution, de la destination.

On distingue les types suivants des circuits électriques du courant alternatif: monophasés et multiphasés; linéaires et non linéaires; aux paramètres concentrés et paramètres distribués; avec l'inductance mutuel et sans l'inductance mutuel; simples et complexes (aux circuits complexe on peut porter les chaînes multiphasés).

De toutes les formes possibles des courants périodiques les courants sinusoïdaux ont obtenu la plus grande application. En comparaison d'autres courants les courants sinusoïdaux ont l'avantage de réaliser d'une façon plus économique la production, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Seulement à l'aide des courants sinusoïdaux on réussit à garder invariable les formes des courbes de tensions et de courants sur tous les section du circuit électrique complexe linéaire.

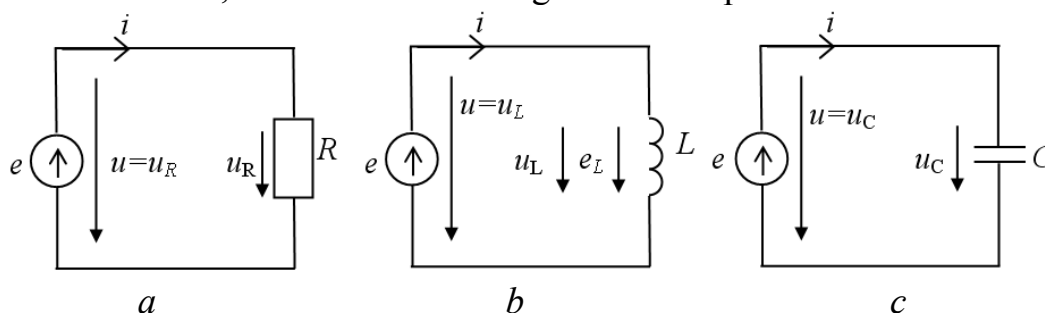


En Ukraine, comme dans la plupart des pays du monde, la production et le transport de l'énergie électrique sont effectuées au courant sinusoïdal triphasé à la fréquence de 50 Hz (aux États-Unis, Canada, Japon et certains états d'Amérique Central et d'Amérique Sud – 60 Hz).

Dans les différents domaines de la technique on utilise une très large gamme de fréquences du courant sinusoïdal en fonction des besoins techniques. Dans l'aviation, par exemple, on applique avec succès le courant sinusoïdal de fréquence de 400 Hz, puisque à une telle fréquence les gabarits et le poids de l'équipement d'aviation diminuent. Dans les installations électrothermiques on utilise une gamme de fréquences de 500 Hz jusqu'à 50 MHz. Les fréquences de quelque centaines de mégahertz à milliard de hertz on utilise dans le domaine de la radiotechnique.

Dans ce chapitre nous examinons certaines questions se rapportant aux circuits avec les courants, changeant selon la loi arbitraire. Lors de l'analyse de ces circuits on compose les schémas électriques du remplacement comprenant les éléments idéaux : la source idéale de la f.é.m., l'élément résistif, l'élément inductif, l'élément capacitif et l'élément de l'induction mutuelle. Chacun de ces éléments reflète un certain phénomène et il est introduit dans le schéma du remplacement quand ce phénomène de la chaîne remplacée veulent prendre en considération.

Les éléments idéaux  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (fig. 4.1) sont passifs, c'est pourquoi les sens positifs des courants et des tensions sont identiques. Dans la source d'alimentation le sens positif du courant et de la f.é.m. coïncident. Le sens positif de la tension de la source est opposée au sens positive de sa f.é.m. À ces sens les significations positives de la valeur instantanée des puissances du récepteur  $p = u \cdot i$  et de la source  $p = e \cdot i$  signifient que le premier d'eux fonctionne comme un récepteur, et le deuxième – comme une source. Aux significations négatives des puissances instantanées le premier se trouve en régime de la source, et deuxième – en régime du récepteur.



**Figure 4.1** – Sens positifs de la f.é.m., du courant et de la tension des éléments idéaux : résistif (a), inductif (b) et capacitif (c)

Nous examinerons plus en détail chacun des éléments du schéma de remplacement de la chaîne avec les courants variables.

## 4.2 Éléments du schéma de substitution avec les courants variables

**4.2.1 Éléments résistif des schémas de substitution.** L'élément résistif est un élément passif du schéma de substitution, caractérisant la présence dans l'élément remplacé des processus irréversibles de la transformation de l'énergie électrique à d'autres formes de l'énergie. Le paramètre d'un élément résistif est

sa résistance active  $R$ , dans laquelle est absorbé l'énergie électrique égale à l'énergie que consomme l'élément réel de la chaîne électrique.

Un élément résistif, par exemple, peut caractériser la résistance du conducteur réel au passage du courant électrique. En ce cas dans lui se diffuse l'énergie égale à l'énergie thermique qui se dissipe dans le conducteur. Il faut avoir en vue que la résistance active d'un tel conducteur est plus grande que sa résistance au courant continu. Cela s'explique par le fait que la densité du courant alternatif est distribuée inégalement sur la section du conducteur. Il a lieu l'effet superficiel (l'expulsion de courant vers la surface du conducteur), ce qui entraîne augmentation des pertes de l'énergie en chauffage. La résistance du conducteur, qui caractérise ces pertes, augmente.

A l'aide d'élément résistif dans le schéma de substitution on présente aussi la présence des pertes de l'énergie dans un noyau magnétique de bobine, qui est insérée dans la chaîne du courant variable.

Nous amènerons par la suite et d'autres exemples, où un élément résistif dans le schéma de substitution caractérise la présence des processus irréversibles de la transformation de l'énergie électrique à d'autres formes de l'énergie dans la chaîne électrique réelle.

La tension  $u$  et le courant  $i$  d'un élément résistif sont liés par l'équation, établi d'après la loi d'Ohm pour les valeurs instantanées

$$u_R = R \cdot i . \quad (4.1)$$

L'équation (4.1) indique à une propriété importante de l'élément résistif: la courbe  $u_R$  suit la forme de la courbe du courant, i.e. les courbes de la tension et du courant de l'élément résistif sont semblables.

La **puissance instantanée** d'un élément résistif est définie selon la formule

$$p_R = u_R \cdot i = R \cdot i^2 , \quad (4.2)$$

elle ne dépend pas de signe du courant et elle est toujours positive. Le signe positif de la puissance indique que, quel que soit le sens du courant en élément résistif, l'énergie toujours entre de la source et sera convertie à l'énergie thermique.

**4.2.2 Élément inductif des schémas de substitution.** Un élément inductif du schéma de substitution de la chaîne réelle avec le courant variable caractérise la présence de variation du champ magnétique généré par ce courant.

**Dans les circuits électriques à courant continu le champ magnétique**, créé par le courant, ne change pas et, par conséquent, **n'a pas d'influence sur le mode de fonctionnement de la chaîne**. Dans les circuits à courant variable tout changement du courant  $I$  dans un élément de la chaîne entraîne une modification de sa propre flux embrassé  $\psi_L$ , conformément à la loi de l'induction électromagnétique est accompagnée d'induction de la f.é.m.  $e_L$  dans cet élément. Ce phénomène est appelé **l'induction propre** et la f.é.m. induite – force électromotrice (f.é.m.) de self-induction.

**La loi de l'induction électromagnétique** (la loi de Faraday) est formulée de la manière suivante: la f.é.m.  $e$  induite dans un conducteur fermé est

proportionnelle à la vitesse de variation du flux magnétique  $\Phi$  qui entre dans ce contour

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} .$$

Le signe  $(-)$  correspond à la loi de Lenz [2.9] qui dit que la tension induite s'oppose par ses effets au changement du flux magnétique de ce contour.

Selon la loi de l'induction électromagnétique la f.é.m. de self-induction est défini par la vitesse du changement de flux magnétique :

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} . \quad (4.3)$$

La valeur de flux embrassé de self-induction électrique d'un élément inductif  $\psi_L$  est proportionnelle à la valeur du courant  $i$  dans cet élément  $\psi_L = L \cdot i$ .

C'est pourquoi la formule pour la f.é.m. de self-induction électrique peut être écrite d'une manière plus générale

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt} . \quad (4.4)$$

À partir des équations (4.3) et (4.4) on voit que **l'inductance  $L$**  de quelque élément de la chaîne peut être considéré comme **le coefficient de proportionnalité entre le flux embrassé  $\psi_L$  et le courant  $i$  de l'élément**, ou comme le coefficient de proportionnalité entre la vitesse du changement du courant d'un élément de la chaîne  $di/dt$  et la f.é.m. de self-induction  $e_L$ , induite dans cet élément.

Lors de l'étude des circuits avec de la f.é.m. de self-induction on est convenus que le sens positive de la f.é.m. de self-induction correspond au sens positif du courant, qui induit cette f.é.m. Par conséquent, la flèche de la f.é.m.  $e_L$  et la flèche du courant  $i$  sur le schéma (voir la figure 4.1, *b*) ont le même sens.

En conséquence le sens réelle de la f.é.m. coïncide au sens indiquées sur le schéma (fig. 4.1, *b*) par la flèche à la diminution du courant dans le circuit, quand  $di/dt < 0$ , et  $e_L > 0$  ; le courant augmentant à la chaîne induit la f.é.m.  $e_L$ , dont le véritable sens est contraire au sens indiqué par la flèche.

Prenon une bobine idéalisée (sans pertes). Le courant alternatif en elle aura lieu à condition que entre ses bornes il y a une tension égale par valeur absolue et à chaque instant opposé en sens à la f.é.m. de self-induction

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{dt} . \quad (4.5)$$

L'unité de base de flux embrassé et de flux de force magnétique dans le système SI est weber (Wb), 1 Wb = 1 V·s ; d'inductance – henry (H), 1 H = Wb/A = 1 V·A/s.

Nous examinerons le changement du courant d'un élément inductif (fig. 4.1, *b*). Si au cours d'un certain intervalle de temps la valeur instantanée du courant est positif ( $i > 0$ ) et est déterminée par le terrain augmentant de la courbe ( $di/dt > 0$ ), alors la tension sur l'élément inductif sera aussi positif ( $u_L > 0$ ). Cela signifie que dans l'intervalle indiqué du temps le sens de la tension  $u_L$  coïncide avec le sens positive de cet tension désignée sur le schéma par la flèche. Cela

signifie que dans l'intervalle indiqué du temps le sens de la tension  $u_L$  coïncide avec le sens positif de cette tension désignée sur le schéma par la flèche.

La puissance instantanée de l'élément inductif  $p_L = u_L \cdot i$  est positive ( $p_L > 0$ ). Donc, l'énergie électrique à cet intervalle du temps provient de la source dans la chaîne et se transforme en énergie du champ magnétique  $L \cdot i^2/2$ .

Si le courant dans la bobine est positif ( $i > 0$ ) et décroissant ( $di/dt < 0$ ), les valeurs de tension et de puissance instantanée sont négatives ( $u_L < 0$ ,  $p < 0$ ). L'énergie du champ magnétique revient à l'inverse à la source. Ainsi, dans le processus de croissance et de diminution du courant dans l'élément inductif il a lieu un échange d'énergie entre la source et le champ magnétique.

**4.2.3 Élément capacitif des schémas de substitution.** Entre les différentes parties des installations électrotechniques il y a un champ électrique des charges qui se trouvent sur ces parties des installations. Quand on veut prendre en considération l'influence du champ électrique variable des éléments de la chaîne on introduit dans le schéma de remplacement de la chaîne réelle au courant variables un élément capacitif (condensateur).

En cas d'application d'une tension variable  $u_C$  (voir la figure 4.1, c) entre les armatures de condensateur, ces derniers s'accablent une charge

$$q = C \cdot u_C, \quad (4.6)$$

où le coefficient de proportionnalité  $C$  est appelé **capacité de condensateur**.

La tension et le courant d'un élément capacitif sont liés par l'équation

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (4.7)$$

Si la tension  $u_C$  augmente, le courant est positif ( $i > 0$ ). Cela signifie qu'au moment donné du temps le courant a le sens coïncidant au sens conventionnelle positive de la tension  $u_C$  (voir la figure 4.1, c). La charge et l'énergie du champ électrique  $W_{el} = C \cdot u_C^2/2 = q \cdot u_C/2$  augmentent de plus. L'énergie de la source est transmise au champ électrique.

Lorsque la tension  $u_C$  diminue, la charge diminue aussi et l'énergie revient du champ à l'inverse à la source. Par conséquent, dans l'élément capacitif de la chaîne il a un échange d'énergie entre la source et le champ électrique. Si on connaît la loi du changement du courant dans l'élément capacitif, la tension peut être déterminée à partir de l'équation

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt + const. \quad (4.8)$$

Lors de l'examen des processus dans les circuits variables d'habitude on estime que la constante  $const$  dans l'équation (4.8) est égale à zéro, puisque la tension  $u_C$  n'a pas de la composante constante ( $u_C = const = 0$ ).

### 4.3 Valeurs efficaces et moyennes des tensions et des courants périodiques

**4.3.1 Valeurs efficaces des tensions et des courants périodiques.** Pour l'estimation de l'efficacité de l'action du courant périodique on utilise son action thermique ou électrodynamique dont on compare à l'action analogue du courant continu pour le même intervalle du temps égal à une période.

*La valeur du courant périodique égal à une telle valeur du courant continu, qui au cours d'une période produit le même effet thermique ou électrodynamique que le courant périodique,* on appelle comme *la valeur efficace du courant périodique*. On désigne les valeurs efficaces du courant, de la tension et de la f.é.m. par les lettres en majuscules sans indices :  $I$ ,  $U$ ,  $E$ .

Lors de l'estimation du courant périodique  $i$ , en raison de l'effet thermique, on accepte que le courant  $I$  et le courant périodique  $i$  de la même élément résistif, dont la résistance active est  $R$ , dissipent la même quantité de chaleur pour le temps de  $T$  égal à une période

$$R \cdot I^2 \cdot T = \int_0^T R i^2 dt .$$

De cette équation on reçoive la valeur efficace du courant

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} , \quad (4.9)$$

qui est égal à la valeur quadratique moyenne du courant périodique.

De même, les valeurs efficaces de la tension et de la f.é.m. sont les valeurs quadratiques moyennes de la tension et de la f.é.m. périodiques

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad \text{et} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} . \quad (4.10)$$

Les appareils électriques de mesure des systèmes thermiques, électromagnétiques, électrodynamiques et électrostatiques ont des pièces mobiles dont les déviations sont proportionnels aux significations quadratiques moyennes des valeurs mesurées par ces appareils. Par conséquent, ces appareils mesurent les valeurs efficaces des courants et des tensions périodiques (voir le chapitre 7).

**4.3.2 Valeurs moyennes des tensions, des courants et de la puissance périodiques.** Dans le cas général sous la valeur moyenne des fonctions périodiques on comprene leurs valeurs moyennes arithmétiques pour la période.

La valeur moyenne de la puissance pour la période est déterminée par l'équation

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt . \quad (4.11)$$

Si les demi-ondes positives et négatives de la courbe du changement de la puissance ne sont pas égales, alors on définit les valeurs moyennes par la différence des surfaces limitées par les courbes des demi-ondes et l'axe des abscisses.

En général, les demi-ondes négatives des courants, des tensions et des f.é.m. répètent leurs demi-ondes positives. C'est pourquoi par les valeurs moyennes des courants, des tensions et des f.é.m. périodiques on comprend les valeurs moyennes maximale de leurs demi-ondes

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt , \\ U_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt , \\ E_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt . \end{array} \right. \quad (4.12)$$

#### 4.4 Présentation des tensions et des courants sinusoïdaux en système de coordonnées cartésien

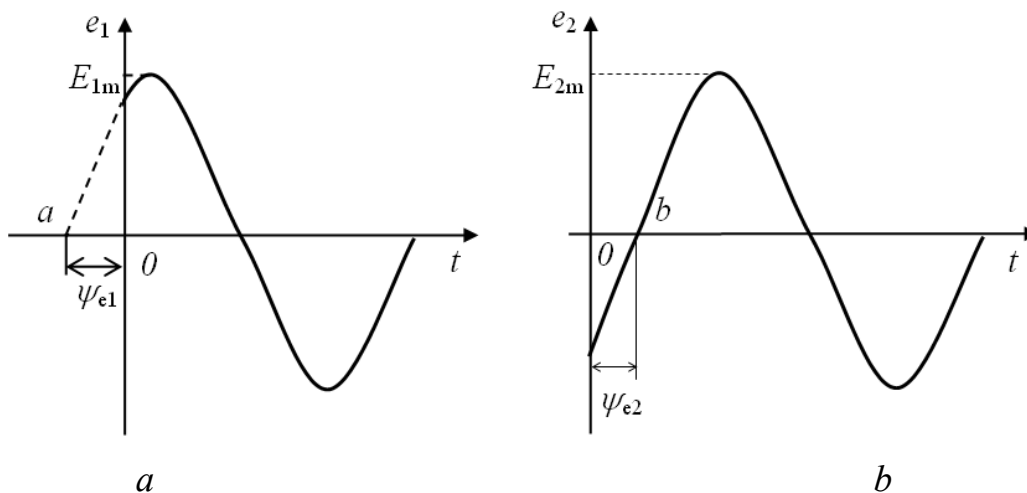
On peut représenter les courants et les tensions sinusoïdaux graphiquement, inscrire à l'aide des équations avec les fonctions trigonométriques et présenter en forme des vecteurs tournant dans le plan cartésien ou dans le plan complexe.

La figure 4.2, *a* et *b* montre les graphiques de deux f.é.m. sinusoïdaux  $e_1$  et  $e_2$  dont les équations

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e1}) ,$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \psi_{e2}) .$$

Les valeurs des arguments de fonctions sinusoïdales  $\omega t + \psi_{e1}$  et  $\omega t - \psi_{e2}$  on appelle **les phases des sinusoïdes**, et la valeur de la phase au moment initial du temps – **la phase initiale**.



**Figure 4.2** – Graphiques de la f.é.m. sinusoïdale avec les différentes phases initiales

Si les points du passage des sinusoides des valeurs négatives instantanées vers les valeurs positives instantanées, qui sont les premiers plus proche du début des coordonnées (les points des courbes *a* et *b* sur la figure 4.2), sont considérés comme le début de la première période de la sinusoïde, la phase initiale, disposée à gauche de l'axe des ordonnées, est comptée avec le signe plus (+), et la phase initiale disposée à droite de l'axe des ordonnées – avec le signe moins (-).

La valeur  $\omega$  dans les phases des sinusoides, qui caractérise la vitesse du changement de l'angle de phase, est appelée **la fréquence angulaire**. En vertu de ce que l'angle de phase de la sinusoïde au cours d'une période  $T$  change sur  $2\pi$ , la fréquence angulaire

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f. \quad (4.13)$$

Lors de l'examen de deux valeurs sinusoïdal d'une fréquence la différence de leurs angles de phase, qui est égale à la différence entre les phases initiales, on appelle **l'angle de déphasage**. L'angle de déphasage des fonctions homonymes sinusoïdales (de la f.é.m., des tensions, des courants) on désigne par la lettre  $\alpha$ . L'angle du déphasage entre les sinusoides de tension et de courant d'un élément de la chaîne on désigne par la lettre  $\varphi$ .

Pour les sinusoides des f.é.m.  $e_1$  et  $e_2$ , dont les graphiques sont représentés sur la figure 4.2, l'angle de déphasage

$$\alpha = (\omega t + \psi_{e1}) - (\omega t - \psi_{e2}) = \psi_{e1} + \psi_{e2}. \quad (4.14)$$

Pour les sinusoides de la tension et du courant

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

dont les graphiques sont représentés sur la figure 4.3, l'angle de déphasage

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

En se servant de l'angle du déphasage, on peut inscrire les équations de la tension et du courant comme il suit :

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi),$$

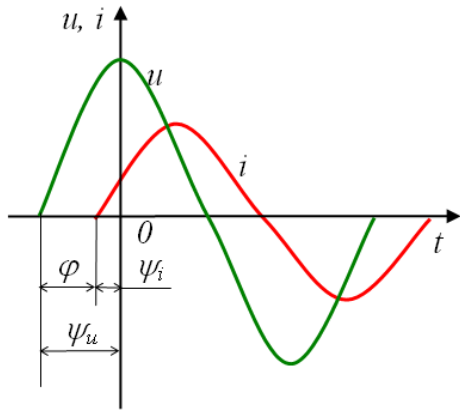
ou

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

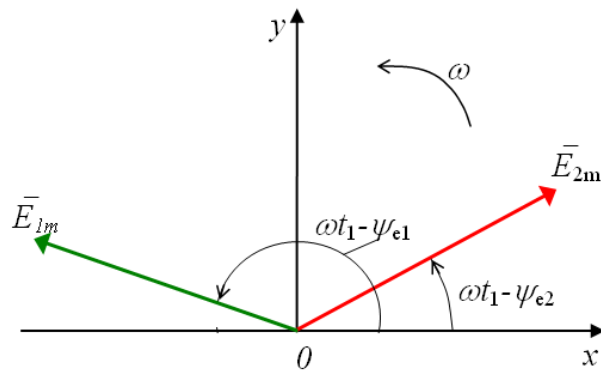
$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi).$$

Ces expressions montrent que le courant sinusoïdal est en arrière selon la phase de la tension sinusoïdal sur l'angle  $\varphi$ , ou la tension sinusoïdal dépasse selon la phase le courant sinusoïdal à l'angle  $\varphi$ .

Lors de la représentation de la f.é.m. sinusoïdale, des tensions et des courants par les vecteurs tournant dans le plan cartésien du début des coordonnées on passe les vecteurs égaux aux significations d'amplitude des valeurs sinusoïdales et tourne ces vecteurs contre la petite aiguille à la vitesse angulaire égale à la fréquence angulaire  $\omega$ . A la rotation on compte l'angle de phase de l'axe positif des abscisses, comme c'est indiqué sur la figure 4.4 pour  $t > 0$ . Les projections des vecteurs tournant sur l'axe des ordonnées sont égales aux valeurs instantanées des f.é.m.  $e_1$  et  $e_2$ .



**Figure 4.3** – Représentation des phases initiales et du déphasage de la tension et du courant sinusoïdaux

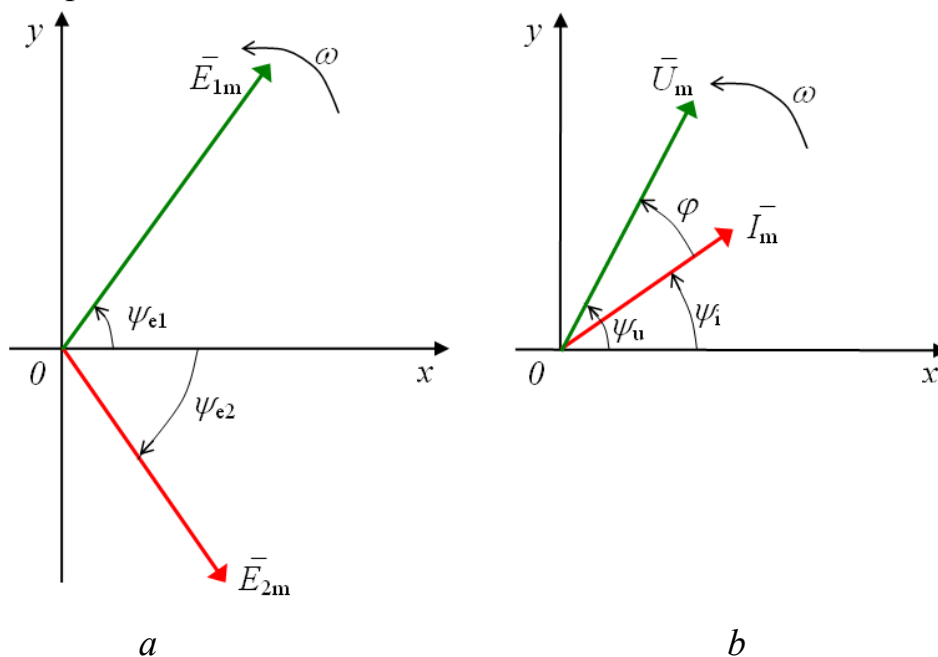


**Figure 4.4** – Représentation des f.é.m. sinusoïdaux par les vecteurs tournants à  $t = t_1$

L'ensemble des vecteurs représentant les f.é.m., les tensions et les courants sinusoïdale d'une fréquence est appelé **les diagrammes vectoriels**.

Lors de la construction de diagrammes vectoriels il est commode placées les vecteurs pour un instant initial de temps ( $t = 0$ ). Dans ce cas, les vecteurs des sinusoïdes des f.é.m.  $e_1$  et  $e_2$  (fig. 4.2) sont disposés comme c'est indiqué sur la figure 4.5, *a*, et les vecteurs des sinusoïdes de la tension  $u$  et du courant  $i$  (fig. 4.3) – comme sur la figure 4.5, *b*.

Les diagrammes vectoriels ont trouvé une large application à l'analyse des modes de fonctionnement des circuits de courant sinusoïdal. Leur application fait le calcul de la chaîne plus évident et plus simple. Cette simplification consiste en ce que l'on peut remplacer l'addition et la soustraction des valeurs instantanées par l'addition et la soustraction de leurs vecteurs.



**Figure 4.5** – Diagrammes vectoriels pour un instant initial de temps  $t = 0$  : *a* – vecteurs des sinusoïdes des f.é.m.  $e_1$  et  $e_2$  ; *b* – vecteurs des sinusoïdes de la tension  $u$  et du courant  $i$



Supposons, par exemple, qu'au point de ramification de la chaîne le courant total est égale à la somme des courants  $i_1$  et  $i_2$  de deux branches. Chacun de ces courants est sinusoïdal et peut être présenté par l'équation :

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) ; \\ i_2 &= I_{2m}\sin(\omega t + \psi_2) . \end{aligned}$$

Courant qui en résulte sera aussi sinusoïdal

$$i_3 = I_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m}\sin(\omega t + \psi_2) = I_{3m}\sin(\omega t + \psi_3) .$$

La définition de l'**amplitude**  $I_{3m}$  et de la phase initiale  $\psi_3$  de ce courant par voie des transformations correspondantes de l'équation reçue est encombrant et peu évidente. Beaucoup plus facile de le faire à l'aide du diagramme vectoriel. La figure 4.6 représente les positions initiales des vecteurs des courants, dont les projections sur l'axe des ordonnées donnent les valeurs instantanées des courants dès le moment du temps  $t = 0$ . Lors de la rotation de ces vecteurs à la vitesse angulaire identique  $\omega$  leur disposition mutuelle ne changera pas l'angle de déphasage entre eux. Il restera égal  $\alpha = \psi_1 - \psi_2$ .

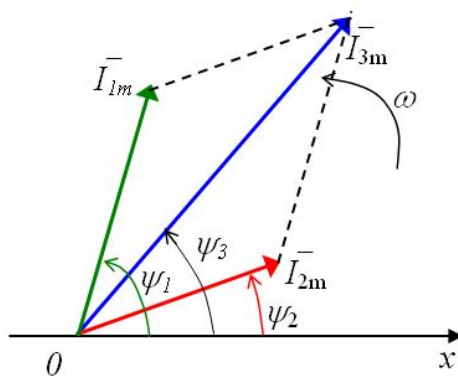
Puisque la somme algébrique des projections des vecteurs sur l'axe des ordonnées est égale à la valeur instantanée du courant total, le vecteur du courant total est égal à la somme géométrique des vecteurs des courants :

$$\bar{I}_{3m} = \bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m} .$$

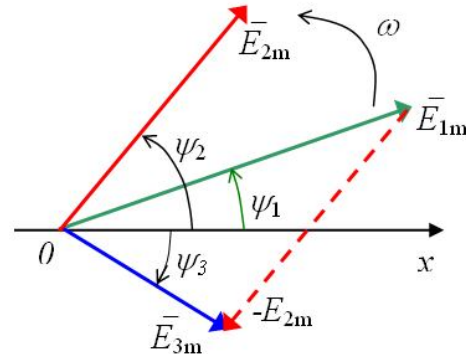
La construction du diagramme vectoriel à l'échelle permet de définir les valeurs  $I_{3m}$  et  $\psi_3$  du diagramme.

La soustraction des valeurs instantanées, par exemple, les f.é.m.  $e_3 = e_1 - e_2$  où  $e_1 = E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1)$  et  $e_2 = E_{2m}\sin(\omega t + \psi_2)$ , on peut remplacer par la soustraction des leurs vecteurs  $\bar{E}_{3m} = \bar{E}_{1m} - \bar{E}_{2m}$  (voir la figure 4.7). Sur le diagramme pour déterminer l'amplitude du vecteur résultant de la F.E.M.  $\bar{E}_{3m}$  on ajoute au vecteur  $\bar{E}_{1m}$  le vecteur inverse  $-\bar{E}_{2m}$ . Selon le diagramme la f.é.m. résultante est définie par l'équation

$$e_3 = E_{3m}\sin(\omega t - \psi_3) .$$



**Figure 4.6** – Remplacement de l'addition des valeurs instantanées des courants par l'addition de leurs vecteurs



**Figure 4.7** – Remplacement de la soustraction des valeurs instantanées de la f.é.m. par la soustraction de leurs vecteurs

## 4.5 Représentation des tensions et des courants sinusoïdaux sous la forme complexe

À l'heure actuelle dans les calculs des circuits électriques avec les f.é.m., les tension et les courants sinusoïdaux est assez effective la méthode des nombres complexes. À la représentation des vecteurs tournant des valeurs sinusoïdales sur le plan complexe on cumule l'axe des abscisses du plan des coordonnées cartésiennes avec l'axe des valeurs valables ou matérielles (l'axe +1) le plan complexe. Alors les valeurs instantanées des grandeurs sinusoïdales reçoivent sur l'axe des valeurs imaginaires (l'axe +j).

Afin de présenter la f.é.m. sinusoïdale

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4.15)$$

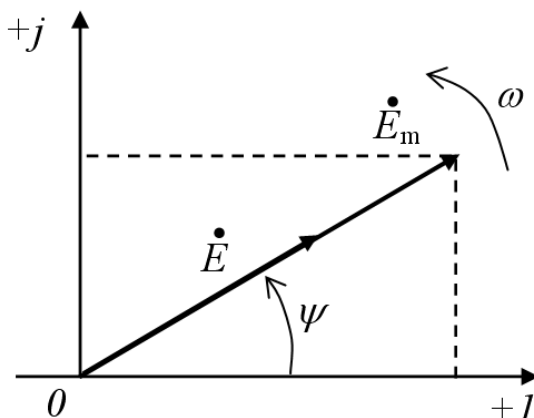
dont la phase initiale  $\psi$ , nous tracerons sur le plan complexe (fig. 4.8) du début des coordonnées sous l'angle  $\psi$  vers l'axe des valeurs valables le vecteur, dont la longueur à l'échelle de la construction est égale à l'amplitude de la f.é.m.  $E_m$ . L'extrémité de ce vecteur se trouve dans le point, à qui correspond le nombre complexe défini – **l'amplitude complexe** de la f.é.m. :

$$\dot{E}_m = E_m e^{j\psi} = E_m \angle \psi. \quad (4.16)$$

Lors de l'augmentation dans le temps de la phase de f.é.m.  $\omega t + \psi$  l'angle entre le vecteur et l'axe des valeurs valables grandit, i.e. il se trouve le vecteur tournant

$$E_m e^{j(\omega t + \psi)} = E_m \cos(\omega t + \psi) + j E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Comme nous voyons, la partie imaginaire du vecteur tournant est égale à la f.é.m. sinusoïdale.



**Figure 4.8** – Représentation de la f.é.m. sinusoïdale par le vecteur tournant sur le plan complexe

Le vecteur sur le plan complexe, dont la longueur à l'échelle de la construction est égale à la valeur efficace de la f.é.m. sinusoïdale, est appelé **la valeur complexe efficace de la f.é.m. sinusoïdale**

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}} = E e^{j\psi} = E \angle \psi. \quad (4.17)$$

On désigne aussi le vecteur lui-même sur le plan complexe (fig. 4.8).

On utilise trois formes d'écriture de la valeur complexe des f.é.m. sinusoïdale, des courants et des puissances. Nous les examinerons à l'exemple de la f.é.m. sinusoïdale.

La **forme algébrique**  $\dot{E} = \text{Re } \dot{E} + j \text{Im } \dot{E}$ , ou dans une autre désignation  $\dot{E} = E' + jE''$ , où  $E' = \text{Re } \dot{E} = E \cos \psi$  et  $E'' = \text{Im } \dot{E} = E \sin \psi$  – les composantes réels et imaginaires de la valeur complexe de la f.é.m. sinusoïdale :

$$E = \sqrt{(\text{Re } \dot{E})^2 + (\text{Im } \dot{E})^2} ; \quad \psi = \arctg \frac{\text{Im } \dot{E}}{\text{Re } \dot{E}} .$$

La forme algébrique est plus commode à l'addition et à la soustraction des nombres complexes.

La **forme trigonométrique** est la dérivée d'algébrique et est commode au passage de la forme exponentielle vers la forme algébrique. En tenant compte de ce que  $\cos \psi = E'/E$  et  $\sin \psi = E''/E$  la notation trigonométrique a la forme suivante  $\dot{E} = E \cos \psi + jE \sin \psi$ .

La **forme exponentielle** est la dérivée de trigonométrique et s'exprime par la relation  $\dot{E} = E e^{j\psi} = E \angle \psi$ . Cette notation est plus commode à la multiplication, la division, l'extrait des racines des nombres complexes.

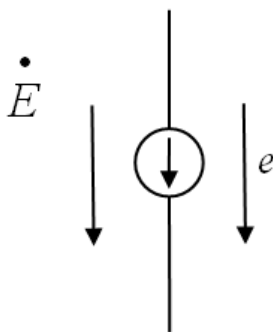
Le passage de la forme exponentielle des valeurs sinusoïdales vers la forme trigonométrique est accompli à l'aide de la formule d'Euler

$$e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi .$$

Ainsi, si on donne la valeur instantanée de la tension (du courant etc.) en forme de la sinusoïde  $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ , alors on inscrit l'amplitude complexe d'abord sous la forme exponentielle, et puis à l'aide de la formule d'Euler on passe à la forme algébrique.

Lors de l'analyse des circuits de courant harmonique on utilise particulièrement les valeurs efficaces complexes des grandeurs sinusoïdales, en abrégé on les appelle **les valeurs complexes** et leurs vecteurs dans le plan complexe – **les vecteurs de valeurs complexes**.

À l'aide du diagramme vectorielle nous pouvons remplacer l'addition et la soustraction des valeurs complexes par l'addition et la soustraction des vecteurs. Cela simplifie les calculs et les rend visibles.



**Figure 4.9** – Choix de la sense positive de la f.é.m. sinusoïdale

Le sens des valeurs sinusoïdales (d'un courant, d'une tension) dans le circuit change périodiquement, mais l'un de deux sens est accepté comme le positif. On choisie ce sens arbitrairement et on le montre par la flèche sur la section du schéma de circuit correspondant. En choisissant le sens positif d'une valeur sinusoïdale on le montre par la valeur instantanée et par la valeur complexe correspondante. Par exemple, pour une tension  $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$  ça fait  $\dot{E} = E \angle \psi$  (voir figure 4.9).

Donc, à la représentation mutuellement univoque des courants sinusoïdaux, des tensions et d'autres valeurs en forme des significations instantanées et complexes correspondent leurs sens identiques positives (fig. 4.9).

L'application des nombres complexes permet de passer de l'addition géométrique ou de la soustraction des vecteurs sur le diagramme vectoriel à l'action algébrique sur les nombres complexes de ces vecteurs. Par exemple, pour la définition de l'amplitude complexe du courant résultant (voir la figure 4.6) il suffit d'additionner deux nombres complexes, correspondant aux amplitudes complexes des courants mis à l'addition :

$$\dot{I}_{3m} = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} = \dot{I}_{3m} e^{j\psi_3},$$

et pour la définition de l'amplitude complexe de la f.é.m. résultante (voir la figure 4.7) il suffit de définir la différence des nombres complexes correspondant aux amplitudes complexes de la f.é.m.  $\dot{E}_{1m}$  и  $\dot{E}_{2m}$

$$\dot{E}_{3m} = \dot{E}_{1m} - \dot{E}_{2m} = \dot{E}_{3m} e^{-j\psi_3}.$$

#### 4.6 Valeurs effectives et moyennes des tensions et des courants sinusoïdaux

Afin de définir la valeur efficace du courant sinusoïdal nous nous servirons de la formule (4.9), en remplaçant les significations instantanées du courant sinusoïdal par son expression

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}.$$

Parce que

$$\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{I_m^2}{2} T,$$

la valeur effective du courant sinusoïdal est moins que son amplitude à  $\sqrt{2}$  fois :

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m. \quad (4.18)$$

De même, on définit les valeurs effectives de la tension et de la f.é.m. sinusoïdales :

$$U = U_m / \sqrt{2} \quad \text{et} \quad E = E_m / \sqrt{2}. \quad (4.19)$$

Les échelles des appareils électriques de mesure, qu'on utilise pour la mesure des courants et des tensions sinusoïdaux, est marqué dans les valeurs effectives et pour la définition des amplitudes des valeurs sinusoïdales il suffit d'augmenter leur déclaration à  $\sqrt{2}$  fois.

Par la valeur moyenne des courants sinusoïdaux on comprend leurs moyennes pour un demi-cycle. Si le courant est  $i = I_m \sin \omega t$ , sa valeur moyenne

$$I_{\text{moy}} = \frac{\int_0^T i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m , \quad (4.20)$$

Par conséquent, la valeur moyenne du courant sinusoïdal fait  $2/\pi$  de sa signification d'amplitude. De même, on détermine les valeurs moyennes des tension et des f.é.m. sinusoïdaux :

$$U_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} U_m , \quad E_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} E_m .$$

La valeur moyenne du courant est mesurée par les appareils du système magnéto-électrique (voir le chapitre 7.4) dont la chaîne contient le redresseur du courant.

#### 4.7 Forme complexe de la notation des lois de Kirchhoff

En cas général, suivant première loi de Kirchhoff la somme algébrique des valeurs complexes des courants des branches se croisant dans un noeud est égale à zéro :

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = \sum_{k=1}^n I'_k + j \sum_{k=1}^n I''_k = 0 , \quad (4.21)$$

où  $\dot{I}_k$  – signification complexe du courant dans le k-ième branche a deux notations

$$\dot{I}_k = I'_k + j I''_k , \text{ et } \dot{I}_k = I_{ak} + j I_{pk} ,$$

où :

$I'_k = I_{ak}$  – **composante active** du courant de la branche k-ième (dans la théorie des nombres complexes – composante réelle) ;

$I''_k = I_{pk}$  – **composante reactive** du courant de la branche k-ième (dans la théorie des nombres complexes – composante imaginaire) ;

$n$  – nombre des branches se convergent dans le noeud.

Selon la deuxième loi de Kirchhoff pour n'importe quel contour fermé la somme algébrique des valeurs complexes de chutes de tensions sur ses branches est égale à la somme algébrique des valeurs complexes des f.é.m., agissant dans ce contour :

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{k=1}^m \dot{E}_k , \quad (4.22)$$

où :

$\dot{U}_k$  – valeur complexe de la chute de tension sur la section k-ième du contour ;

$\dot{E}_k$  – valeur complexe de la f.é.m. de la section k-ième du contour ;

$n$  – nombre des sections avec les éléments passifs ;

$m$  – nombre des sections avec les f.é.m.

Pour les tensions et les f.é.m., comme en cas des courants complexes, deux notations ont lieu

$$\dot{U}_k = U'_k + jU''_k = U_{ak} + jU_{rk} , \quad (4.23)$$

$$\dot{E}_k = E'_k + jE''_k = E_{ak} + jE_{rk} , \quad (4.24)$$

où :

$U'_k = U_{ak}$  et  $E'_k = E_{ak}$  – composantes active de la chute de tension et de f.é.m. en k-ième branche (dans la théorie des nombres complexes – la composante réelle) ;

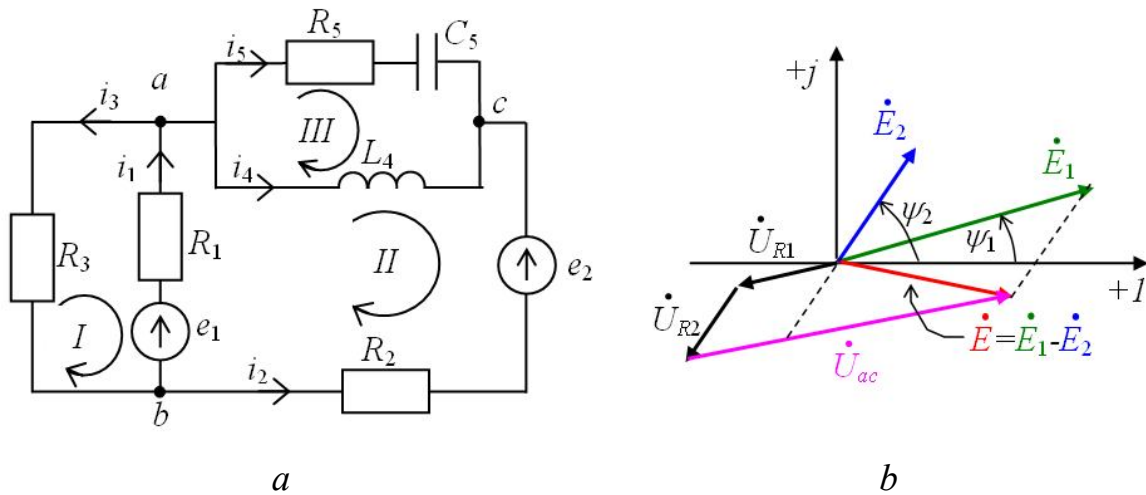
$U''_k = U_{rk}$ ,  $E''_k = E_{rk}$  – composantes reactive de la chute de tension et de f.é.m. en branche k-ième (dans la théorie des nombres complexes – la composante imaginaire).

En cas de notation des équations en forme complexe d'après les lois de Kirchhoff la règle des signes est le même que dans les circuits à courant continu.

Nous examinerons l'inscription des lois de Kirchhoff à l'exemple du schéma de la chaîne électrique (fig. 4.10, a), où agissent les f.é.m. sinusoïdaux, dont les valeurs instantanées sont définies par les équations :

$$e_1 = E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1),$$

$$e_2 = E_{2m}\sin(\omega t + \psi_2) .$$



**Figure 4.10** – Schéma du réseau électrique du courant alternatif (a) et diagramme vectoriel de la f.é.m. et des tensions du II-ème contour (b)

Sous l'action de ces f.é.m. dans toutes les branches de la chaîne apparaissent des courants sinusoïdaux et sur ses sections séparés apparaîtront les chutes de tension sinusoïdales.

Pour définir les courants du schéma donné aux valeurs établies des f.é.m.  $e_1$  et  $e_2$  et les résistances (actives  $R_1 - R_5$ , inductif  $L_4$  et capacitif  $C_5$ ) d'après les lois de Kirchhoff il faut établir un système de cinq équations. L'ordre de la rédaction des équations est le même que dans le cas du courant continu (voir le chapitre 2.7).

Les équations d'après la première loi de Kirchhoff élaborés pour les noeuds  $a$  et  $b$ , sont suivant :

$$\text{pour le noeud } a : \dot{I}_1 - \dot{I}_3 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0 ; \quad (4.25)$$

$$\text{pour le noeud } b : -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 . \quad (4.26)$$

Les équations, élaborés pour les contours (I), (II) et (III) d'après la deuxième loi de Kirchhoff, lors de la définition du détour des contours selon la petite aiguille, auront la forme suivante :

$$\text{pour le contour I} : -R_1 \dot{I}_1 + R_3 \dot{I}_3 = -\dot{E}_1 ; \quad (4.27)$$

$$\text{pour le contour II} : R_1 \dot{I}_1 + jX_4 \dot{I}_4 - R_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 ; \quad (4.28)$$

$$\text{pour le contour III} : (R_5 - jX_5) \dot{I}_5 - jX_4 \dot{I}_4 = 0 . \quad (4.29)$$

Ainsi, les équations reçues (4.25) – (4.29) présentent les lois de Kirchhoff inscrites sous la forme complexe pour le schéma du réseau électrique selon la figure 4.10, a.

La figure 4.10, b montre, à titre d'exemple, le diagramme vectoriel de la f.é.m. et des tensions du contour II et illustre évidemment la deuxième loi de Kirchhoff en forme complexe.

## Conclusions principales

1. En raison d'un certain nombre d'avantages technologiques et économiques le courant alternatif (sinusoïdal) a reçu plus grande utilisation que le courant continu.

2. Dans les circuits électriques en courant alternatif, à la différence des circuits à courant continu, les éléments inductif et capacitif exercent l'influence sur le mode de la chaîne.

3. Pour l'estimation de la valeur efficace du courant alternatif on produise la comparaison de l'effet de son passage dans l'élément du schéma avec l'effet analogue au passage dans cet élément du courant continu.

4. La valeur moyenne du courant alternatif (sinusoïdal) est déterminée par la moitié de sa période.

5. Les courants et les tension sinusoïdaux peuvent être présentés en forme des fonctions trigonométriques, en forme des graphiques du changement en temps, en forme des vecteurs tournant et en forme des nombres complexes.

6. Les valeurs complexes des courants et des tension sinusoïdaux peuvent être présentées sous la forme exponentielle, la forme trigonométrique et la forme algébrique.

7. L'application des nombres complexes pour l'analyse des circuits électriques du courant alternatif permet de simplifier les calculs et les rendre plus évident.

## Questions pour la maîtrise de soi

1. Quel courant électrique est considéré comme alternatif ? Un courant périodique ?
2. Pourquoi le courant alternatif a reçu plus grande utilisation que le courant continu ?
3. Quelle fréquence du courant alternatif a reçu la plus grande utilisation ?
4. Expliquer les caractéristiques d'un élément résistif (inductif, capacitif) de la chaîne électrique.
5. Une inductance, qu'est-ce que c'est ?
6. En quoi consiste la différence des procès physiques dans un élément inductif au passage du courant continu et du courant alternatif ?
7. Formulez la loi de l'induction électromagnétique.
8. Expliquez le phénomène de l'induction propre.
9. Quelles sont les unités de mesurage de l'inductance ?
10. Une capacité, qu'est-ce que c'est ?
11. En quoi consiste la différence des procès physiques dans un élément capacitif à son fonctionnement dans un circuit en courant continu et en courant alternatif ?
12. Qu'est ce que la valeur efficace du courant périodique ? De la tension périodique ?
13. Qu'est ce que la valeur moyenne du courant périodique sinusoïdal ? De la tension périodique ?
14. Expliquez les paramètres du courant et de la tension sinusoïdal.
15. Qu'est ce que la phase de courant harmonique ?
16. L'angle de déphasage, qu'est-ce que c'est ?
17. Quelles formes utilise-t-on pour représenter des vecteurs des sinusoïdes des f.é.m., des tensions et des courants ?
18. Qu'est ce que le diagramme vectoriel ? En quoi consiste son avantage à l'analyse de la chaîne électrique ?
19. Quelles sont les formes de notations des valeurs complexes des courants sinusoïdaux ?
20. Notez l'expression de la tension dans la forme complexe et expliquez ses éléments.
21. À quoi sert la formule d'Euler ?
22. Notez les lois de Kirchhoff en forme complexe et donnez leur explications.



## Chapitre 5 : CIRCUITS ÉLECTRIQUES À COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ

**Notions clés :** résistance active (inductive, capacitive),  $f$ ; réactance inductive (capacitive),  $f$ ; inductance,  $f$ ; capacitance,  $f$ ; impedabce,  $f$ ; admittance  $f$ ; conductance,  $f$ ; susceptance,  $f$ ; puissance active (réactive, réactive inductive, réactive capacitive, apparente),  $f$ ; triangle des résistances,  $m$ ; résonance de tension (de courants),  $f$ ; composante active (réactive) du courant,  $f$ ; facteur de puissance,  $m$ .

### 5.1 Circuit électrique avec un élément résistive

Supposons que à l'entrée d'une chaîne avec un élément résistive dont **la résistance**  $R$  (fig. 5.1, *a*), on connecte la tension sinusoïdal

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.1)$$

Examinons comment varie le courant et la puissance de cette chaîne.

On peut définir le courant en circuit, en se servant de la loi d'Ohm pour les valeurs instantanées

$$i = u/R = U_m \sin(\omega t + \psi_u)/R,$$

$$\text{ou} \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad \psi_i = \psi_u. \quad (5.2)$$

À partir de la comparaison des équations (5.2) et (5.1) nous voyons que la sinusoïde du courant a la même fréquence que la sinusoïde de la tension et coïncide avec celle-ci selon la phase.

L'amplitude du courant est liée à l'amplitude de la tension par rapport

$$I_m = U_m/R. \quad (5.3)$$

Si on divise les parties gauches et droites de l'expression (5.3) sur  $\sqrt{2}$ , nous recevrons une nouvelle formule pour les valeurs efficaces du courant et de la tension

$$I = U/R, \quad (5.4)$$

qui exprime la loi d'Ohm pour un circuit avec un élément résistif. Selon cette loi, la valeur efficace du courant dans une chaîne avec un élément résistif est égale à la tension réelle divisée à la résistance active de cet élément.

La **valeur instantanée de la puissance** de cette chaîne est égal au produit des valeurs instantanées de la tension et du courant :

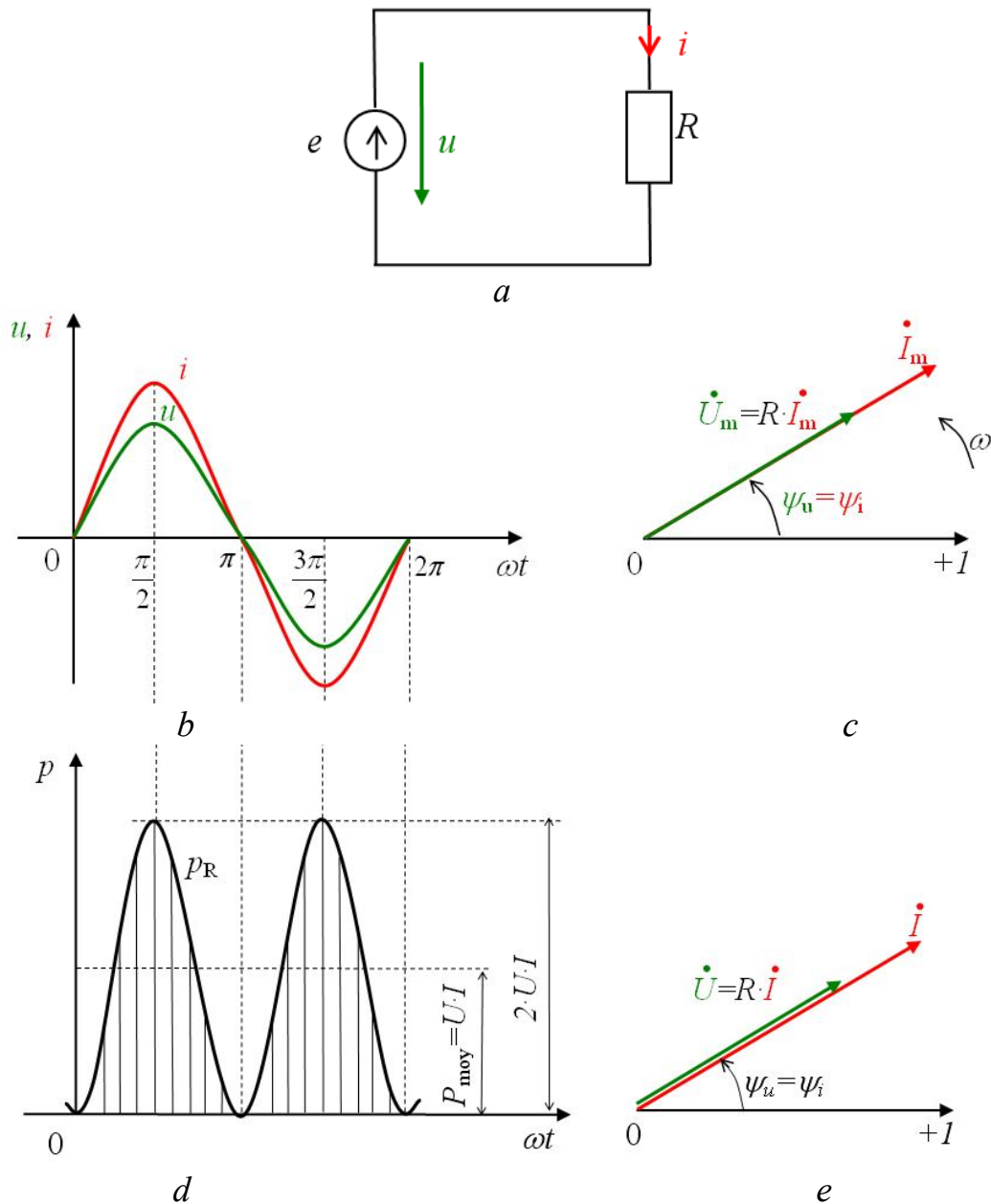
$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)}{2},$$

$$\text{ou} \quad P = I \cdot U \cdot \cos(\omega t + \psi_u). \quad (5.5)$$

La puissance moyen pour une période

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi_u) dt,$$

$$\text{ou} \quad P = I \cdot U.$$



**Figure 5.1** – Circuit avec un élément résistif :  
 a – schéma ; b – graphiques des valeurs instantanées de la tension et du courant ;  
 c – diagrammes vectoriels des amplitudes complexes ; d – graphiques des valeurs instantanées de la puissance ; e – diagrammes vectoriels des valeurs complexes du courant et de la tension

Si dans cette expression de la puissance moyenne remplacer la tension de sa valeur  $U = R \cdot I$  de (5.4), nous recevrons

$$P = I \cdot U = R \cdot I^2, \quad (5.6)$$

c'est à dire que **la valeur moyenne de la puissance dans un circuit est égale à sa puissance active.**

Les graphiques  $u$ ,  $i$  (fig. 5.1, b) et  $p$  (fig. 5.1, d) montrent les changements de tension, de courant et de puissance dans la résistance active  $R$  (fig. 5.1, a) selon les équations (5.1), (5.2) et (5.5) pour le cas, quand la phase initiale  $\psi_u = 0$ .

On voit dans la figure 5.1, *d* que la puissance instantanée dans la résistance change du zéro jusqu'à  $2P = 2U \cdot I$ , en restant tout le temps positif. Cela signifie qu'à ***n'importe quelle direction du courant dans un élément résistif l'énergie provient de la source à la chaîne et se transforme en énergie thermique.*** On peut caractériser la valeur de l'énergie transformée pour la période par la surface limitée par la courbe de puissance et l'axe des abscisses.

Pour dessiner le diagramme vectoriel de la tension et du courant de la circuit dans le plan complexe, nous écrivons leurs amplitudes complexes selon les équations (5.1) et (5.2) :

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} ; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m e^{j\psi_u} . \quad (5.7)$$

L'amplitude de la tension en (5.3) on peut s'exprimer à travers l'amplitude de courant, alors l'amplitude complexe de la tension nous pouvons écrire sous la forme suivante :

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = R \cdot I_m e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I}_m . \quad (5.8)$$

À partir de l'expression (5.8) il vient que le vecteur représentant la sinusoïde de la tension aux bornes d'une résistance, coïncide en sens avec le vecteur représentant la sinusoïde du courant. Le diagramme vectoriel des amplitudes complexes de tension et de courant est tracé sur la figure 5.1, *c*.

Toutefois, lors du calcul des circuits de courant harmonique à la place des vecteurs d'amplitudes complexes on utilise les vecteurs complexes des valeurs efficace de la tension  $\dot{U}$  et du courant  $\dot{I}$ . Ces vecteurs coïncident respectivement en sens aux vecteurs  $\dot{U}_m$  et  $\dot{I}_m$  s'en distinguent seulement par la valeur :

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_u} , \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = R \cdot I e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I} . \quad (5.9)$$

La figure 5.1, *e* montre un diagramme vectoriel des valeurs complexes de la tension et du courant d'un élément résistif. À partir du diagramme il vient que ***le vecteur de la tension aux bornes du résistor R correspond en sens au vecteur de courant et est égal à la valeur complexe de courant multiplié par la résistance active du résistor.***

À partir de l'expression (5.9), on obtient l'équation

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} , \quad (5.10)$$

qui définit la loi d'Ohm dans la forme complexe pour la chaîne avec un élément résistive. Selon cette loi, ***la valeur complexe du courant dans un circuit avec une résistor est égale à la valeur complexe de la tension divisé par la résistance active du résistor.***

## 5.2 La chaîne électrique avec une bobine parfaite

Supposons que dans une bobine à inductance  $L$ , dont la résistance active est très faible ( $R \approx 0$ ) il y a un courant sinusoïdal (fig. 5.2, *a*)

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (5.11)$$

qui induit dans cette bobine une force électromotrice de self-induction

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = E_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}), \quad (5.12)$$

avec  $E_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m$  – l'amplitude de la f.é.m. sinusoïdale.

À partir des équations (5.11) et (5.12), il vient que la sinusoïde de la f.é.m. de self-induction est en retard de phase sur la sinusoïde du courant sur l'angle du déphasage  $\pi/2$ .

La tension extérieure de la source  $u = u_L$  est équilibrée par la force électromotrice de self-induction  $e_L$ . La sinusoïde de cette tension

$$u = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}). \quad (5.13)$$

À partir de (5.13) on voit que la sinusoïde de tension d'une bobine parfaite est en avance de phase sur la sinusoïde de courant sur l'angle de déphasage  $\pi/2$ .

L'amplitude de la sinusoïde de tension sur la bobine

$$U_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m. \quad (5.14)$$

La valeurs efficace de cette tension

$$U_L = \omega \cdot L \cdot I. \quad (5.15)$$

Les amplitudes complexes du courant et de la tension :

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i},$$

$$\dot{U}_{Lm} = U_{Lm} e^{j(\psi_i + \pi/2)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j\pi/2} = \omega L \dot{I}_m,$$

ou 
$$\dot{U}_{Lm} = j\omega L \dot{I}_m.$$

Les valeurs complexes du courant et de la tension de bobine :

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}, \quad \dot{U}_L = j\omega L \dot{I}. \quad (5.16)$$

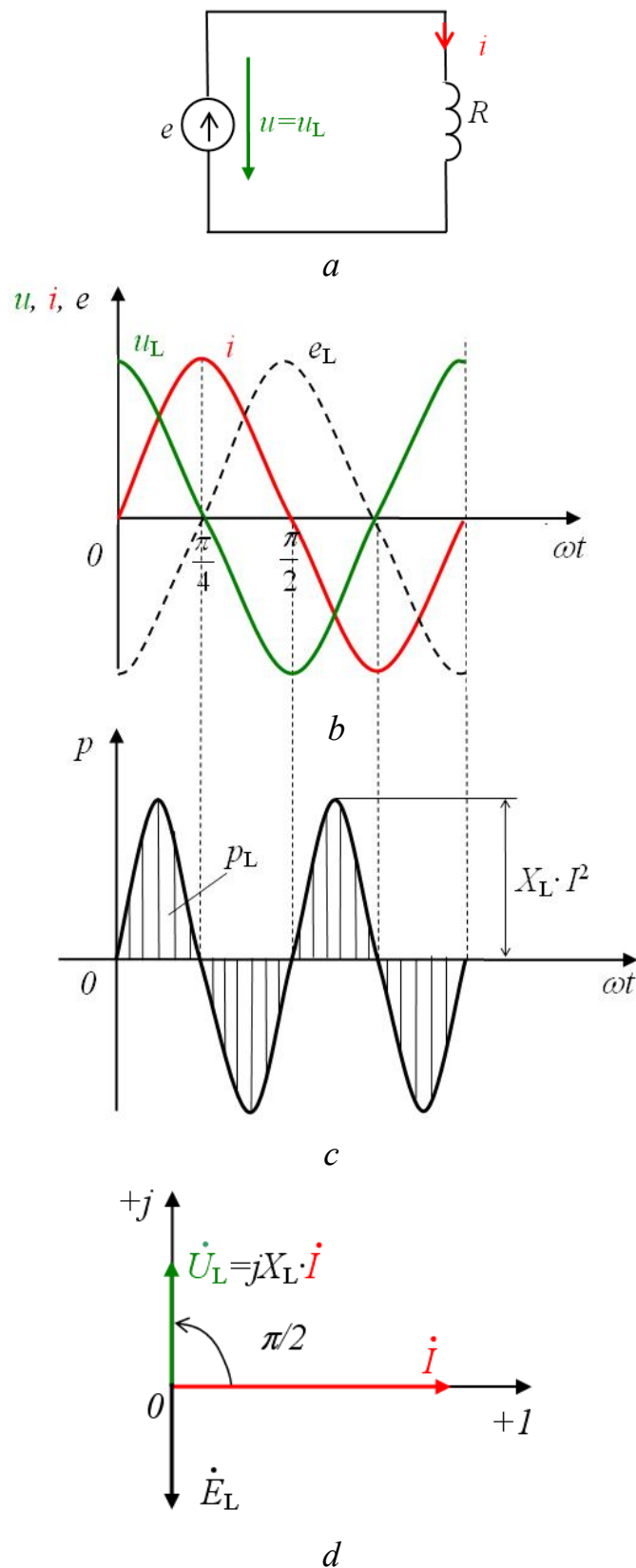
La figure 5.2, *b* représente les graphiques des sinusoïdes de la tension  $u_L$ , du courant  $i$ , et de la f.é.m. de self-induction  $e_L$ , et la figure 5.2, *g* – correspondant à ces sinusoïdes les vecteurs de leurs valeurs complexes  $\dot{U}_L$ ,  $\dot{I}$  et  $\dot{E}_L$  pour le cas  $\psi_i = 0$ .

La multiplication  $\omega \cdot L$  a la dimension d'une résistance

$$[\omega \cdot L] = \frac{1}{s} \cdot H = \frac{1}{s} \cdot \Omega \cdot s = \Omega.$$

*est désignée comme  $X_L$  et est appelée résistance inductive de la bobine :*

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L. \quad (5.17)$$



**Figure 5.2** – Schema (a), graphiques des valeurs instantanées (b, c) et diagramme vectoriel d'une chaîne avec une bobine parfaite (d)

La quantité  $j\omega \cdot L = jX_L$  est appelée *réactance complexe inductive de la bobine parfaite ou complexe de la réactance inductive*.

*La réactance inductive est directement proportionnelle à l'inductance de la bobine et à la fréquence du courant.*

Selon l'expression de (5.15) la valeur efficace de la tension inductifs de la bobine  $U_L$  est égale à la valeur efficace du courant  $I$  multipliée par la résistance inductive de la bobine.

À partir des équations (5.16) on voit que le **vecteur de la tension aux bornes d'une bobine idéale est en avance de  $\pi/2$  sur le vecteur du couran.**

À partir des équations (5.16), on peut recevoir également la formule pour la valeur complexe du courant

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{j\omega L} = \frac{\dot{U}_L}{jX_L} \quad , \quad (5.18)$$

qui exprime la loi de l'Ohm sous la forme complexe pour la chaîne avec la bobine parfaite inductive. I.e. conformément à la loi de l'Ohm **la signification complexe du courant  $\dot{I}$  à la chaîne avec une bobine parfaite est égale à la valeur de la tension sur la bobine  $\dot{U}_L$  divisé à la valeur complexe de la résistance inductive de la bobine  $jX_L$ .**

La valeur instantanée de la puissance dans un circuit de bobine parfaite

$$\begin{aligned} p_L &= u_L i = U_{Lm} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} I_m \frac{1}{2} [\cos(+\pi/2) - \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2)] = \\ &= -U_L I \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2) , \end{aligned}$$

ou 
$$p_L = U_L I \sin(2\omega t + 2\psi_i) . \quad \dots(5.19)$$

Le graphique de cette puissance en cas  $\psi_i = 0$  est présenté sur la figure 5.2, c.

Au premier quart de la période, lorsque le courant et la tension sont positif, la puissance est aussi positive. L'énergie  $W_L = L \cdot i^2/2$  de la source passe à la chaîne et est dépensé sur la création du champ magnétique. À la fin du premier quart de la période le champ a l'énergie maximale  $L \cdot I_m^2/2$ . Elle est proportionnelle à la place ombragée, limitée par l'axe des abscisses et la première demi-onde de la sinusoïde de la puissance.

Au deuxième quart de la période le courant  $i$  diminue, mais il reste positif. La tension  $u_L$  et la puissance  $p_L$  sont négatifs. L'énergie du champ magnétique revient à l'inverse à la source. À la fin du deuxième quart de la période tout le stock de l'énergie  $L \cdot I_m^2/2$  sera rendu à la source. C'est pourquoi pour une période la valeur moyen de la puissance de la chaîne avec la bobine idéale est égale à zéro :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0 .$$

Ainsi, dans une **chaîne avec une bobine parfaite il y a des oscillations (échange) continues de l'énergie entre la source et le champ magnétique de la bobine sans dépense d'énergie de la source.**

Par analogie avec la puissance active d'un circuit de la résistance parfaite on introduit pour le circuit d'une bobine parfaite la notion de la **puissance réactive inductive**

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2 . \quad (5.20)$$

La puissance réactive de la bobine a la même dimensionnalité que la puissance active. Mais en vue du confort pour les unités de mesure de la puissance réactive on pris une autre définition – **volt-ampère réactif** (var).

### 5.3 Circuit électrique avec un condensateur parfait

Que vers un condensateur parfait, dont le diélectrique est idéal et n'a pas des pertes de l'énergie, on amène une tension sinusoïdal (fig. 5.3, a)

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.21)$$

Le courant dans un condensateur (4.7)

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u),$$

$$\text{ou} \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2), \quad (5.22)$$

avec  $I_m$  = amplitude du courant

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_{Cm}. \quad (5.23)$$

La valeur efficace du courant

$$I = \omega \cdot C \cdot U_C = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{U_C}{X_C}. \quad (5.24)$$

La valeur

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5.25)$$

a la dimension de la résistance :

$$[X_C] = \frac{s \cdot V}{C} = \frac{V \cdot s}{A \cdot s} = \Omega,$$

et est appelée **résistance capacitive du condensateur** ou tout simplement **réactance capacitive**.

La réactance capacitive est inversement proportionnelle à la fréquence de la source d'alimentation et à la capacité du condensateur.

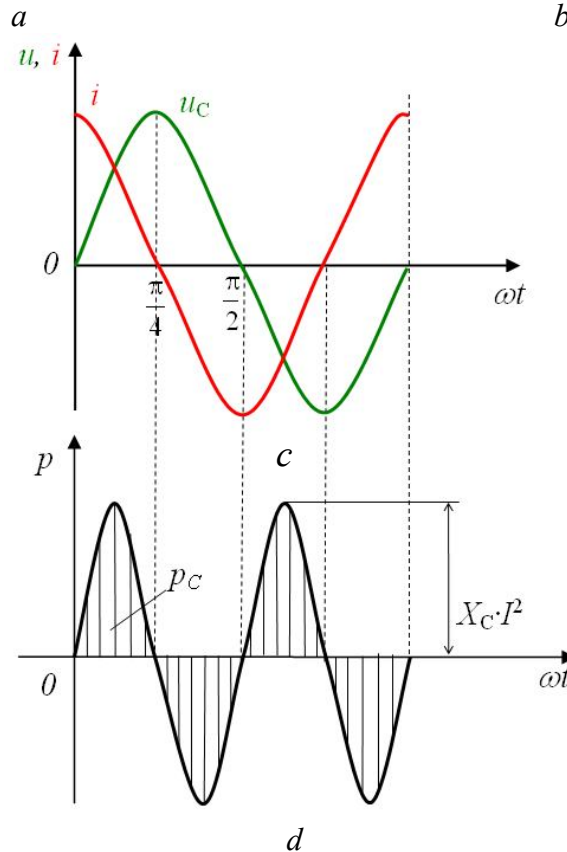
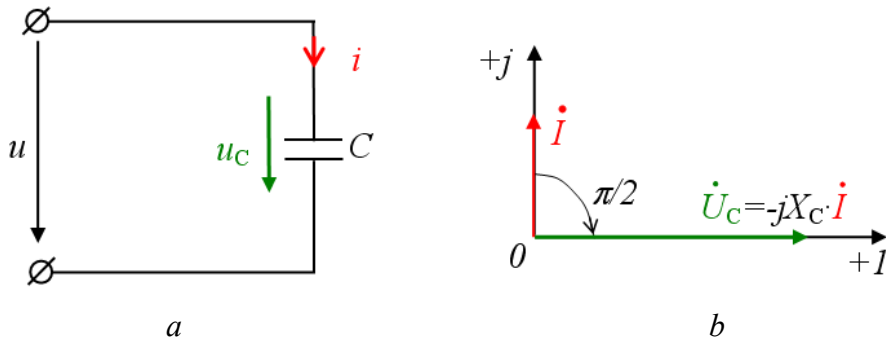
En comparant les équations (5.21) et (5.22), nous voyons que **la sinusoïde du courant capacitif est en avance de  $\pi/2$  sur la sinusoïde de la tension aux bornes d'un condensateur parfait**.

La figure 5.3, b montre les graphiques  $i$ ,  $u_C$  et la figure 5.3, d – les vecteurs des valeurs efficaces de courant et de tension aux bornes d'un condensateur parfait qui sont obtenus à partir des équations (5.21) et (5.22) pour le cas, quand la phase initiale  $\psi_u = 0$ .

Les amplitudes complexes de la tension et du courant, correspondant aux équations (5.21) et (5.22), sont égales :

$$\dot{U}_{Cm} = U_{Cm} e^{j\psi_u},$$

$$\dot{I}_m = I_m e^{j(\psi_u + 90^\circ)} = \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} e^{j90^\circ} = j \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} = j \frac{\dot{U}_{Cm}}{X_C} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{-jX_C}.$$



**Figure 5.3** – Schéma (a), diagramme vectoriel (b) et graphiques des valeurs instantanées (c, d) et de la chaîne avec un condensateur parfait

Ayant divisé la partie gauche et droite de la dernière expression sur  $\sqrt{2}$  nous recevrons l'équation reliant les valeurs complexes de courant et de tension :

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C} \quad (5.26)$$

avec  $jX_C$  – un complexe de la résistance capacitive.

L'équation (5.26) exprime la loi de l'Ohm sous la forme complexe pour le secteur de la chaîne avec un condensateur parfait: **complexe du courant d'un condensateur est égal au complexe de la tension divisé par le complexe de la résistance capacitive du condensateur.**



La tension sur le condensateur, défini de la formule (5.26), est égal au produit de son courant et du complexe de la réactance capacitive :

$$\dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}. \quad (5.27)$$

À partir de l'équation (5.27) ou du diagramme vectoriel de la figure 5.3, *b*, il vient que le **vecteur de tension sur un condensateur parfait est en retard de  $\pi/2$  sur le vecteur de courant.**

La valeur instantanée de la puissance

$$p_C = u_C \cdot i = U_{Cm} \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_u) \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2)$$

ou 
$$p_C = U_C \cdot I \cdot \sin 2(\omega t + \psi_u). \quad (5.28)$$

La valeur moyenne de la puissance pour la période de la chaîne avec un condensateur parfait est égale à zéro :

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T p_C dt = 0.$$

Comme dans un circuit avec la bobine parfaite, on observe ici les procès d'oscillation de l'énergie  $W_C = C \cdot u_C^2 / 2$  et l'alternance des intervalles de temps, pendant lesquelles l'énergie de la source est stocké dans le champ électrique du condensateur, avec des intervalles de temps, quand l'énergie de la chaîne revient à l'inverse à la source. Pour illustrer ces processus la figure 5.3, *c* montre le graphique du changement de la puissance dans le circuit pour le cas  $\psi_C = 0$ . En le comparant avec graphiques du changement de la tension et du courant à la chaîne, nous voyons qu'au premier quart de la période les valeurs de  $u_C$ ,  $i$  et  $p_C$  sont positifs, le condensateur se recharge. À ce temps nous observons l'accumulation de l'énergie dans le champ électrique du condensateur grâce à l'énergie provenant de la source d'alimentation. À la fin du premier quart de la période le champ stocke l'énergie maximale  $C \cdot U_{Cm}^2 / 2$ . Pendant le deuxième quart de la période la tension  $u_C$  diminue, le condensateur se décharge. Le courant  $i$  et la puissance  $p_C$  sont négatifs. L'énergie du champ revient à l'inverse à la source.

L'amplitude des oscillations de puissance dans un circuit avec un condensateur on appelle **puissance réactive capacitive** et on l'indique  $Q_C$ . Selon l'équation (5.28) la valeur de cette puissance

$$Q_C = U_C \cdot I = X_C \cdot I^2. \quad (5.29)$$

Par analogie avec la puissance réactive inductive, la puissance réactive capacitive est mesurée en volts-ampères réactifs (var).

#### 5.4 Circuit électrique avec une bobine réelle

Soit dans une bobine d'induction réelle dont l'inductance  $L$  et une résistance active  $R$  (schéma de substitution est présentée sur la figure 5.4, *a*) circule le courant

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (5.30)$$

Nous définissons la loi de changement de la tension  $u$  à ses bornes.

La valeur instantanée de la tension  $u$  nous inscrirons à partir de la deuxième loi de Kirchhoff

$$u = u_R + u_L = R \cdot i + L \cdot di/dt, \quad (5.31)$$

où  $u_R$ ,  $u_L$  – en conséquence les tensions sur les composantes résistive et inductive de la bobine (fig. 5.4, a).

Dans les chapitres 5.1 et 5.2 nous avons montré que chacune des tensions  $u_R$  et  $u_L$  est sinusoïdale et a une fréquence égale à la fréquence du courant  $i$ . C'est pourquoi la tension  $u$  est aussi sinusoïdal. Supposons qu'elle peut être inscrit par l'équation

$$u = U_m \sin(\omega t \pm \psi_u). \quad (5.32)$$

L'amplitude  $U_m$  et la phase initiale  $\psi_u$  de la tension  $u$  nous définirons en se servant de la méthode complexe. Nous inscrirons l'équation (5.31) sous la forme complexe

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L. \quad (5.33)$$

Selon l'équation (5.31) la valeur complexe du courant

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i}. \quad (5.34)$$

Alors les valeurs complexes des tensions :

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \text{ et } \dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}.$$

En substituant les valeurs  $\dot{U}_R$  et  $\dot{U}_L$  à (5.33), nous obtenons l'équation de la tension complète à l'entrée du schéma :

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} = (R + jX_L) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}. \quad (5.35)$$

La valeur complexe  $\underline{Z}$  a la dimension d'une résistance et est le coefficient de la proportionnalité entre les valeurs complexes de la tension et du courant de la chaîne. C'est pourquoi  $\underline{Z} = R + jX_L$  on appelle **complexe de l'impédance de la bobine inductive**. Sa partie réelle est la résistance active  $R$  et sa partie imaginaire – la résistance inductive de la bobine  $jX_L$ .

Dans les équations, dont la valeur  $\underline{Z}$  est ou un multiplicateur ou un diviseur, il est commode d'utiliser non la forme algébrique mais la forme exponentielle de sa représentation :

$$\underline{Z} = R + jX_L = Z \cdot e^{j\varphi_L}, \quad (5.36)$$

où  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  – module d'un complexe de l'impédance de la bobine d'induction et  $\varphi_L = \arctg X_L/R$  – son argument.

Il faut noter que la désignation de la résistance complexe se distingue de la désignation des complexes du courant et de la tension – au lieu d'un point au-dessus de la lettre le symbole de la résistance complexe a la ligne d'en bas. Cette différence s'exprime par le fait que le complexe  $\underline{Z}$  lui-même ne sert pas de la représentation de la fonction sinusoïdale, mais il est le nombre complexe, à l'aide duquel on compare les représentations complexes du courant et de la tension.

En substituant à (5.35) la signification  $\underline{Z}$  de (5.36), et la signification  $\dot{I}$  de (5.34) nous recevons

$$\dot{U} = Z e^{j\varphi_L} \cdot I e^{j\psi_i} = Z \cdot I e^{j(\psi_i + \varphi_L)} = U e^{j\psi_u}, \quad (5.37)$$

où 
$$U = Z \cdot I, \quad \psi_u = \psi_i + \varphi_L. \quad (5.38)$$

La phase initiale  $\psi_u$  est positive, c'est pourquoi dans l'équation (5.32) elle doit être prise avec le signe « plus ».

En connaissant les valeurs  $U$  et  $\psi_u$ , on peut inscrire l'équation (5.32) dans la version définitive :

$$u = Z \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_L). \quad (5.39)$$

En comparant les équations (5.39) et (5.30), nous voyons que la sinusoïde de la tension sur l'entrée de la bobine est en avance de l'angle du déphasage  $\varphi = \varphi_L$  sur la sinusoïde du courant.

De l'expression (5.35) on peut recevoir la formule de la loi de l'Ohm pour la bobine inductive sous la forme complexe

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}. \quad (5.40)$$

Selon cette formule, **le complexe du courant dans la bobine d'induction est égal au complexe de la tension divisée par le complexe de l'impédance de la bobine.**

La figure 5.4, *b*, montre le diagramme vectoriel du schéma de l'image 5.4, *a*.

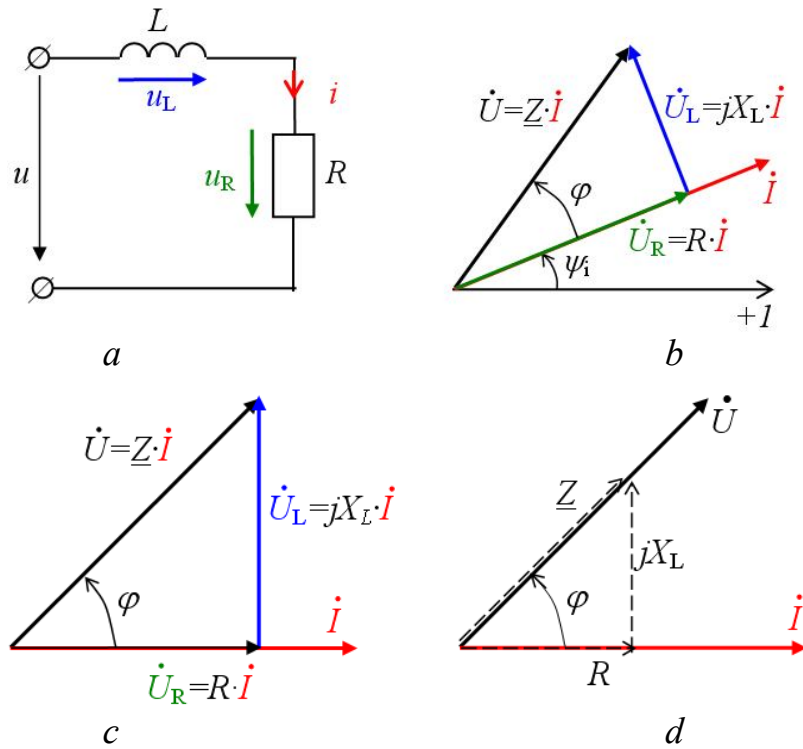
Lors de la construction de ce diagramme pour initial on prend le vecteur de courant  $\dot{I}$  disposé sous l'angle  $\psi_i$  vers l'axe +1.

Le vecteur de la tension aux bornes de la résistance  $\dot{U} = R \cdot \dot{I}$  est en phase avec le vecteur du courant, et le vecteur de la tension sur l'élément inductif  $\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}$  est en avance de l'angle du déphasage  $\pi/2$  sur le vecteur du courant. Le vecteur de la tension  $\dot{U}$  est égale à la somme géométrique des vecteurs  $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L$ . Il est en avance de l'angle du déphasage  $\varphi = \varphi_L$  sur le vecteur du courant.

Le diagramme vectoriel de la figure 5.4, *b* est appelé **triangle des tensions**. Pour simplifier le diagramme on croit la phase initiale du courant  $\psi_i$  égale à zéro, alors le vecteur du courant coïncide avec l'axe de +1 et le triangle des tensions se trouve sur un plan, comme c'est indiqué sur la figure 5.4, *c*.

Si chacun des côtés du triangle des tensions (voir fig. 5.4, *c*) divisé par  $\dot{I}$ , on obtient le **triangle des complexes des résistances** (fig. 5.4, *d*). Cette figure montre que le module  $Z$  du complexe de la résistance imaginaire est l'hypoténuse du triangle rectangle des résistances complexes dont les parties sont les résistances activement  $R$  et inductive  $jX_L$ . De même, nous pouvons définir l'angle du déphasage :

$$\cos \varphi_L = R/Z. \quad (5.41)$$



**Figure 5.4** – Schéma (a), triangles de tensions et de résistances d'une bobine avec une résistance active et une inductance (b, c, d)

### 5.5 Puissance de la bobine d'induction

Afin de simplifier l'examen, nous prendrons que la phase initiale du courant dans la bobine (fig. 5.4, a)  $\psi_i = 0$ . Alors la valeur instantanée du courant (5.30) peut être écrit  $i = I_m \sin \omega t$ , et la tension sur la bobine d'induction  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_L)$ . La figure 5.5, a montre les graphiques des valeurs instantanées de la tension et du courant de cette bobine.

La valeur instantanée de la puissance est égal au produit des valeurs instantanées de la tension et du courant :

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi_L) \sin \omega t = U_m \cdot I_m [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)]/2. \quad (5.45)$$

La figure 5.5, b montre le graphique de la valeur instantanée de la puissance, fait de l'équation (5.45).

La valeur moyenne de la puissance sur une période

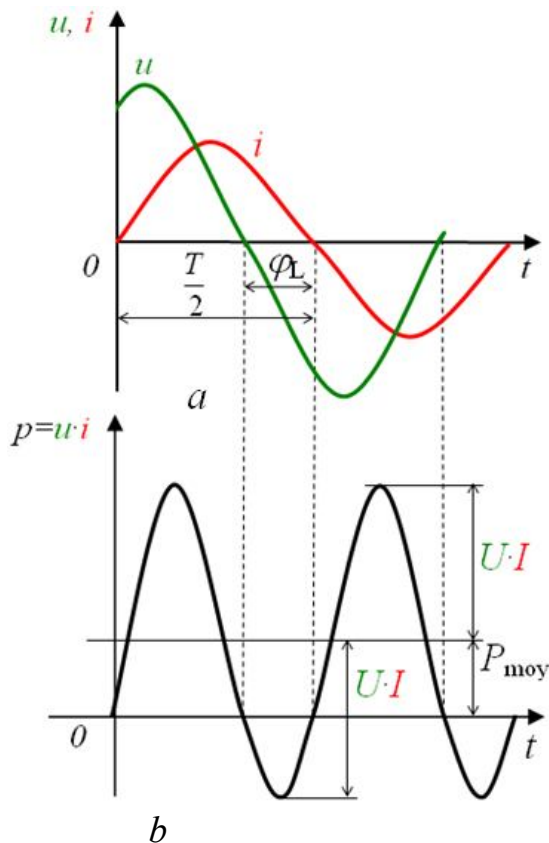
$$P_{\text{moy}} = P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)] dt ,$$

ou

$$P_{\text{moy}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_L .$$

De sorte que  $U = Z \cdot I$ , et  $\cos \varphi_L = R/Z$ , alors la valeur moyenne de la puissance on peut définir autrement

$$P_{\text{moy}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_L = Z \cdot I \cdot I \cdot R/Z = R \cdot I^2. \quad (5.46)$$



**Figure 5.5** – Graphiques des valeurs instantanées pour le schéma de la figure 5.4, a :  
a – de la tension et du courant ; b – de la puissance

À partir de l'équation (5.46) on voit que **la valeur moyenne de la puissance dans circuit** (fig. 5.4, a) **est égale à sa puissance active**. C'est pourquoi la puissance moyenne d'un circuit du courant sinusoïdal d'habitude on appelle puissance active. **La puissance active est égale au produit des valeurs efficaces de la tension et du courant par le cosinus de l'angle du déphasage entre eux**.

La plus grande valeur de la puissance active, qui peut être reçue aux significations données de la tension et du courant, on appelle **puissance apparente** et on l'indique par la lettre *S*. De l'équation (5.46) il vienne qu'à  $\cos \varphi = 1$  la puissance apparente

$$P_m = S = U \cdot I . \quad (5.47)$$

La valeur

$$X_L \cdot I^2 = U_L \cdot I = U \cdot I \cdot \sin \varphi_L$$

est la puissance réactive inductive de la chaîne :

$$Q_L = X_L \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \sin \varphi_L . \quad (5.48)$$

Les puissances actives, réactives et apparante sont liées par les rapports :

$$\begin{aligned} P^2 + Q_L^2 &= (U \cdot I \cdot \cos \varphi_L)^2 + (U \cdot I \cdot \sin \varphi_L)^2 = \\ &= (U \cdot I)^2 (\cos^2 \varphi_L + \sin^2 \varphi_L) = (U \cdot I)^2 = S , \end{aligned}$$

ou 
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (5.49)$$

Bien que toutes trois puissance de la chaîne (actif, réactif et apparente) ont la même dimension, pour leur différence on introduit les unités des noms divers: pour la puissance active – les Watts (W), pour la puissance réactive – les volts ampères réactif (var), pour la puissance apparente – les Volts Ampères (VA).

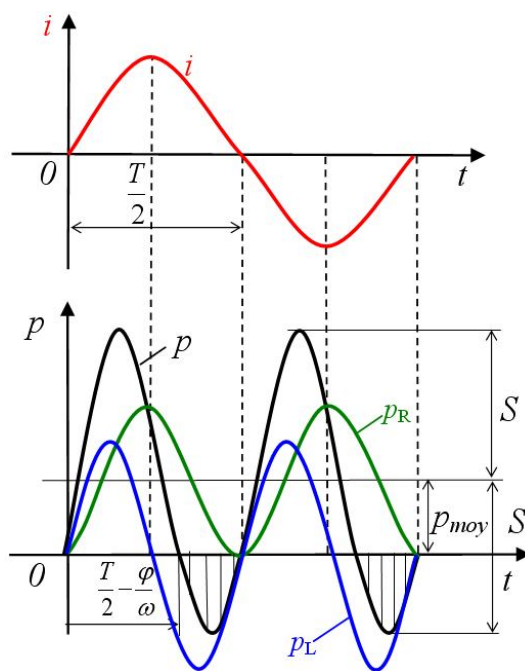
Pour déterminer les valeurs de chacune des puissance, nous revenons à l'examen des graphiques des valeurs instantanées de la tension, du courant et de la puissance, representés sur la figure 5.5.

Afin de faire l'analyse du processus énergétique plus détaillée nous présenterons la tension *u* par les composantes actives et réactives  $u = u_R + u_L$  et nous le mettrons à la formule pour la puissance instantanée :

$$p = u \cdot i = (u_R + u_L) \cdot i = p_R + p_L .$$

Le premier terme représente la valeur instantanée de la puissance active dont le graphique a été présenté sur la figure 5.1, *b*. Le deuxième terme est la puissance réactive inductive dont le graphique a été aussi présenté précédemment dans la figure 5.2, *b*. Pour construire des graphiques de ces puissances sur la figure 5.6, *a* est désigné la sinusoïde du courant  $i$ , transférée de la figure 5.5, *a*, et les graphiques des puissance  $p_R$  et  $p_L$ , transférées des figures 5.1, *b* et 5.2, *b*. Par sommation des ordonnées des courbes de  $p_R$  et  $p_L$  on reçoit la courbe résultante de puissance  $p$ , analogue à la courbe de cette puissance sur la figure 5.5, *b*.

À partir d'une comparaison des graphiques (fig. 5.6) on voit qu'au premier quart de la période le courant est positif et augmente. Toutes les puissances  $p_R$ ,  $p_L$  et  $p$  sont aussi positives. Cela signifie que dans cet intervalle de temps l'énergie de la source se dépense sur l'énergie thermique et sur l'énergie, stockée dans le champ magnétique de la bobine. À la fin du premier quart de la période le champ magnétique stocke l'énergie maximal  $L \cdot I_m^2 / 2$ .



**Figure 5.6** – Graphiques des valeurs instantanées du courant et des puissances  $p_R$ ,  $p_L$  et  $p$  du schéma de la figure 5.4, *a*.

ordonnées de la courbe  $p_L$  sont numériquement égales à la somme des ordonnées des courbes  $p$  et  $p_R$ . Cela signifie que l'énergie provenant du champ magnétique retourne à la source et se dépense partiellement sur l'énergie thermique et partiellement revient à la source. À l'intervalle  $\Delta t = \phi_L / \omega$  vers la source revient l'énergie égale à l'aire, limitée sur cette intervalle de temps par la courbe  $p$  et l'axe des abscisses (ombrée sur la figure 5.6).

Deux quarts de la période suivants le processus énergétique se répétera à une autre direction du courant.

De l'examen ci-dessus il résulte que **la puissance apparente  $S$  caractérise l'amplitude des oscillations de puissance  $S = U \cdot I$  près de la valeur moyenne de la puissance**. La puissance  $P$  varie d'une valeur positive  $+P$  jusqu'à une valeur négative  $-P$ .

Au deuxième quart de la période le courant diminue. Diminue aussi le champ magnétique et le stock de l'énergie de la bobine. Une partie de l'énergie du champ magnétique revient à l'inverse à la source ( $p_L < 0$ ).

À l'intervalle de temps de  $t = T/4$  jusqu'à  $t = T/2 - \phi_L / \omega$  la puissance de la source  $p$  est moins que la puissance active  $p_R$ . À ce moment la partie de l'énergie, qui se diffuse en forme de l'énergie thermique dans la résistance  $R$ , entre partiellement de la source et partiellement du champ magnétique. Au moment du temps  $t = T/2 - \phi_L / \omega$  toute l'énergie thermique est obtenu à partir de l'énergie entrant à la chaîne du champ magnétique ( $p = 0$ ,  $p_R = p_L$ ).

À l'intervalle de temps de  $t = T/2 - \phi_L / \omega$  jusqu'à  $t = T/2$  la puissance  $p_R > 0$ , mais les

**La puissance active  $P$  est une puissance moyenne de la transformation de l'énergie électrique en d'autres formes.** La valeur  $P$  dépend non seulement du courant et de la tension, mais aussi de  $\cos\varphi$ , qui on appelle d'habitude **facteur de puissance** :

$$\cos\varphi = P/S. \quad (5.50)$$

Le facteur de puissance dépend du rapport entre la résistance actif et la résistance inductif. Sa valeur montre quelle partie de la puissance apparente de la chaîne fait la puissance active.

**La puissance réactive  $Q_L$  caractérise l'amplitude des fluctuations de puissance de l'échange d'énergie entre la source et le champ magnétique de la bobine.**

On peut obtenir les puissances actives, réactives et apparente à partir des valeurs complexes de la tension  $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$  et du courant  $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$ . Il est nécessaire de prendre pour cela un conjugué d'un complexe du courant (est désigné par l'astérisque)  $I^* = I^{-j\psi_i}$  et le multiplier par le complexe de la tension  $\dot{U}$  :

$$\dot{U} \cdot I^* = Ue^{j\psi_u} \cdot I^{-j\psi_i} = U \cdot Ie^{j(\psi_u - \psi_i)} = Se^{j\varphi_L}.$$

Cette multiplication on désigne par la lettre  $S$  et on appelle **complexe de la puissance apparente**

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot I^* = Se^{j\varphi_L} = S \cos\varphi_L + jS \sin\varphi_L = P + jQ_L. \quad (5.51)$$

De l'équation (5.51) on voit que par **la partie réelle du complexe de la puissance apparente est la puissance active  $P$ , la partie imaginaire – le complexe de la puissance réactive  $jQ$ .**

## 5.6 Connexion en série d'une résistance et d'un condensateur parfait

Supposons que dans une chaîne (fig. 5.7, a), comprenant une résistance et un condensateur idéalisé connectés en série, il y a un courant sinusoïdal  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ . Nous pouvons écrire l'expression de la tension d'entrée de cette chaîne selon la deuxième loi de Kirchhoff en forme complexe

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C.$$

Une valeur complexe du courant peut être inscrite selon l'équation de la valeur instantanée du courant :

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = Ie^{j\psi_i}.$$

Alors les complexes des tensions active et capacitif sont

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \text{ et } \dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}.$$

Le complexe de la tension à l'entrée de la chaîne

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} - jX_C \cdot \dot{I} = (R - jX_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}.$$

À partir de la dernière équation nous obtenons la formule de la loi d'Ohm sous la forme complexe pour la chaîne étudiée

$$\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z}. \quad (5.52)$$

Le complexe de la résistance imaginaire (d'impédance) de la chaîne capacitive

$$\underline{Z} = R - jX_C = \sqrt{R^2 + X_C^2} e^{-j\varphi_C} = Ze^{-j\varphi_C}, \quad (5.53)$$

où :

$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  – module du complexe d'impédance de la chaîne ;

$\varphi_C = \arctg X_C/R$  – son argument.

Si l'expression (5.52) recopier sous la forme

$$Ie^{j\psi_i} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ze^{-j\varphi_C}},$$

alors, on peut recevoir deux ratios :

$$I = U / Z, \quad (5.54)$$

et

$$\psi_i = \psi_u + \varphi_C. \quad (5.55)$$

L'équation (5.54) représente le rapport entre les modules des valeurs efficaces de la tension et du courant à l'entrée de la chaîne étudiée (fig. 5.7, a).

À partir de l'expression (5.55) il vient que la phase initiale de la tension  $\psi_u$  est moins que la phase initiale du courant  $\psi_i$  sur l'angle du déphasage  $\varphi_C$ . Par conséquent, la tension d'entrée de la chaîne capacitive considéré est en retard de l'angle du déphasage  $\varphi_C$  sur le courant. On peut illustrer cela par un triangle des tensions, présenté à la figure 5.7, b pour la chaîne capacitive. Pour faciliter la construction nous considérons que la phase initiale du courant  $\psi_i$  est égale à zéro. Le vecteur courant  $\dot{I}$  est dirigé selon l'axe de +1. Avec lui est en phase le vecteur de la tension active  $\dot{U}_R$  et le vecteur de la tension sur le condensateur  $\dot{U}_C$  est en retard selon la phase sur l'angle du déphasage  $\pi/2$ . Le vecteur résultant de la tension d'entrée de la chaîne est en retard de l'angle du déphasage  $\varphi_C$  sur le vecteur du courant. La valeur instantanée de cette tension

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_C).$$

La puissance instantanée de la chaîne capacitive examinée (fig. 5.7, a)

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi_C) \sin \omega t,$$

ou

$$p = U \cdot I [\cos \varphi_C - \cos(2\omega t - \varphi_C)].$$

La valeur moyenne de la puissance pour la période

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C.$$

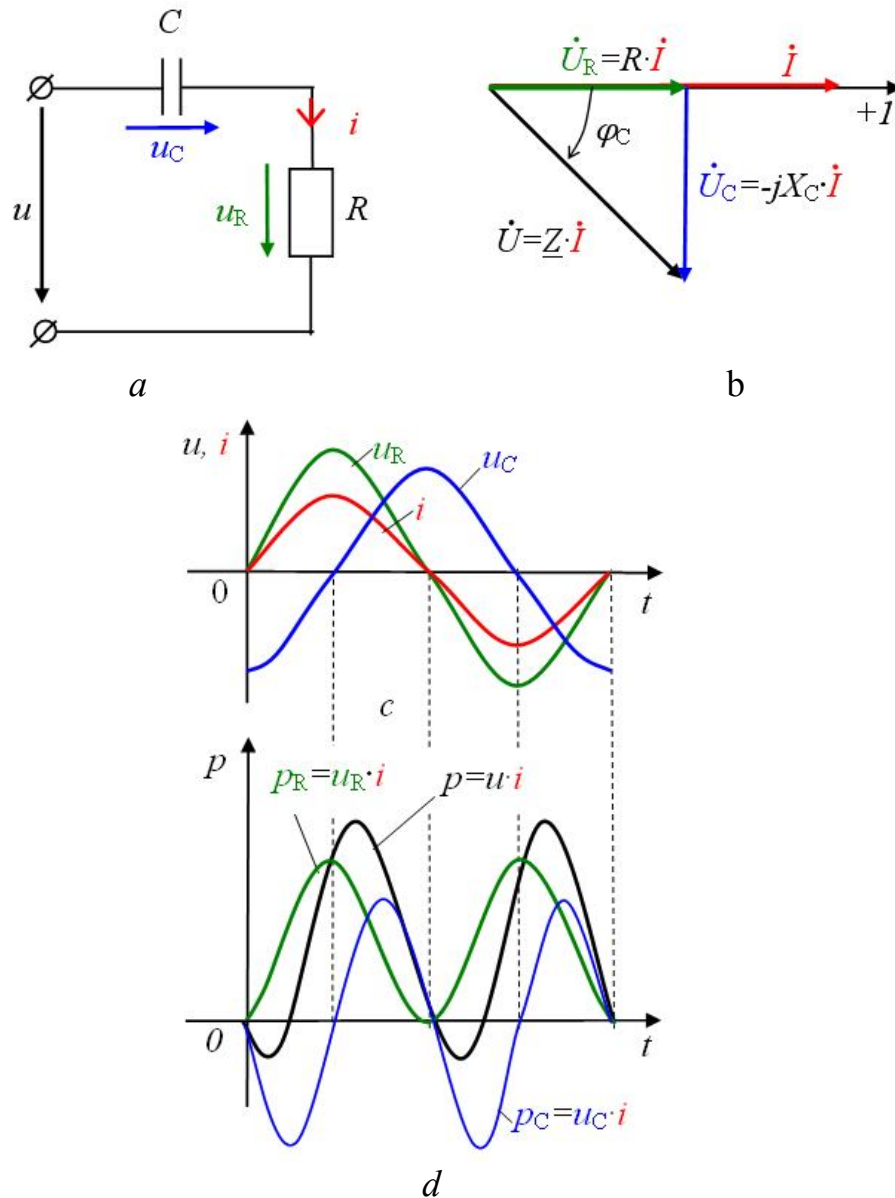
Comme pour la chaîne d'induction (fig. 5.4, a), la valeur moyenne de la puissance du dipôle capacitif est égale à sa puissance active, de sorte que

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C = Z \cdot I \cdot I \cdot \frac{R}{Z} = R \cdot I^2.$$

***La puissance réactive, qui caractérise l'amplitude des fluctuations de puissance des échanges d'énergie entre la chaîne et le champ électrique du condensateur***

$$Q = X_C \cdot I^2 = U \cdot I \sin \varphi_C. \quad (5.56)$$





**Figure 5.7** – Schéma (a), graphiques des significations instantanées des tensions, du courant et des puissances (c, d), diagramme vectoriel (b) d'une chaîne de la résistance et de la capacité connecté en série

La puissance apparente

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q_C^2} \quad (5.57)$$

Le complexe de la puissance apparente

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U \cdot e^{j\psi_u} \cdot I \cdot e^{-j\psi_i} = U \cdot I \cdot e^{j(\psi_u - \psi_i)} = U \cdot I \cdot e^{-j\varphi_C},$$

ou

$$\underline{S} = S \cdot e^{-j\varphi_C} = S \cdot \cos \varphi_C - jS \cdot \sin \varphi_C = P - jQ_C \quad (5.58)$$

Il faut noter que, la puissance complexe n'est pas une représentation de la sinusoïde, c'est pourquoi sur son symbole ne mettent pas un point. Le symbole de la puissance complexe, ainsi que le symbole de l'impédance complexe, soulignent.

Selon l'équation (5.58) le complexe de la puissance réactive capacitive est la partie imaginaire négative du complexe de la puissance apparente.

Les figures 5.7, *c* et *d* montrent les courbes des valeurs instantanées du courant  $i$ , des tensions actif  $u_R$  et capacitif  $u_C$ , ainsi que des puissances active  $p_R = u_R \cdot i$ , réactif (capacitif)  $p_C = u_C \cdot i$  et complet  $p = u \cdot i$ .

À partir de l'analyse des figures on voit que dans un intervalle de temps, lorsque  $p_C > 0$ , il y a une conversion simultanée de l'énergie provenant de la source d'alimentation, en l'énergie thermique et en l'énergie du champ électrique du condensateur.

Dans un intervalle de temps, quand  $p_C < 0$ , l'énergie du champ électrique du condensateur revient à l'inverse à la chaîne. À  $p_C > p_R$  la partie de cette énergie revient à la source, et la partie sera transformée en énergie thermique. La puissance en ce moment est négative. Lors de  $p_C < p_R$  la conversion de l'énergie électrique en l'énergie thermique se réalise grâce à l'énergie provenant de la source d'alimentation et du champ électrique du condensateur.

### 5.7 Connexion en série d'une bobine d'induction et d'un condensateur

Les éléments réels des chaînes électriques ont les composantes inductif, capacitif et résistive de la résistance et ils peuvent être présentés par le schéma du remplacement contenant  $R$ ,  $L$  et  $C$  connectés en série (fig. 5.8, *a*). Si dans une telle chaîne passe le courant  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$ , dont la signification complexe est  $\dot{I} = I e^{j\varphi_i}$ , alors on peut inscrire l'équation pour la tension d'entrée de la chaîne selon la deuxième loi de Kirchhoff sous la forme complexe

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (5.59)$$

Si les complexes de tension des sections résistif, inductif et capacitif remplacer par les produits des complexes de la résistance et du courant, alors on peut réécrire l'équation (5.59) comme il suit :

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} - jX_C \cdot \dot{I} = (R + jX_L - jX_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}, \quad (5.60)$$

où  $\underline{Z}$  – complexe de l'impédance de la chaîne, défini par le rapport

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R \pm jX, \quad (5.61)$$

où  $X = X_L - X_C$  – **résistance réactive** de la chaîne.

En fonction du rapport entre les résistances inductif et capacitif de la chaîne examinée sa résistance totale réactive  $X$  peut être : inductif ( $X_L > X_C$ ), capacitif ( $X_L < X_C$ ) et purement actif ( $X_L = X_C$ ).

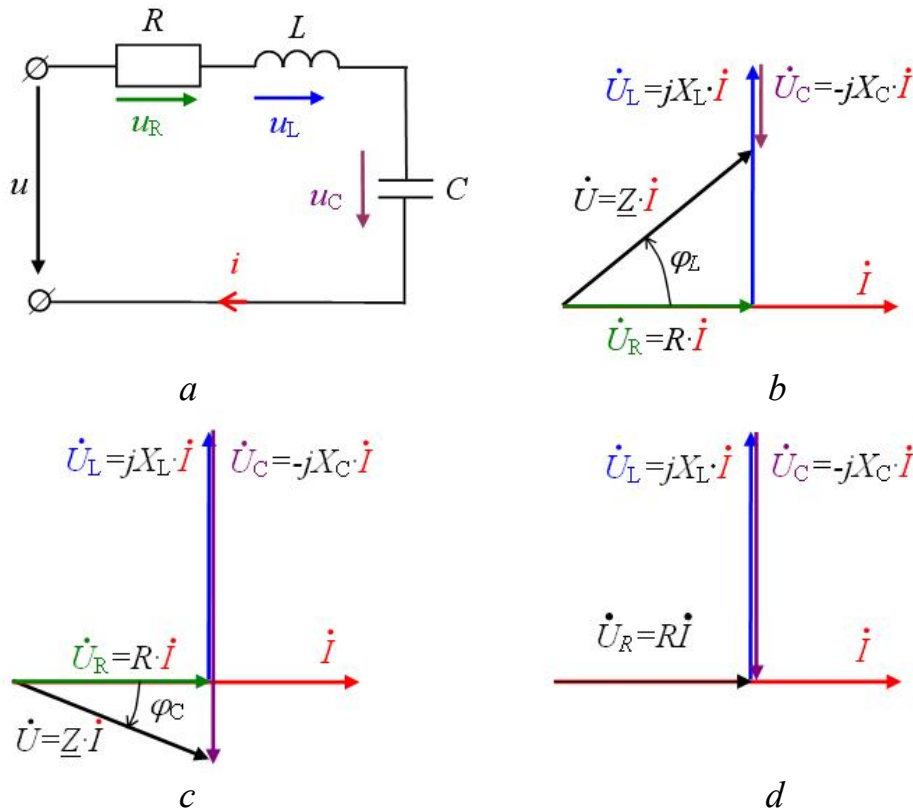
Les complexes de l'impédance de la chaîne dans ces cas sont définis par les équations suivantes :

- |                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| 1) $Z = R + jX$ | en cas $X_L > X_C$ ; |
| 2) $Z = R - jX$ | en cas $X_L < X_C$ ; |
| 3) $Z = R$      | en cas $X_L = X_C$ . |

Les figures 5.8. *b*, *c* et *d* montrent les diagrammes vectoriels de ces trois cas. La phase initiale du courant  $\psi_i$  sur ces diagrammes est acceptée égale à zéro.

Alors, le complexe de l'impédance de l'élément pour tous trois cas est s'inscrit sous la forme suivante :

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + jX. \quad (5.62)$$



**Figure 5.8** – Schéma (a) et diagrammes vectoriels en cas :  
 $b - X_L > X_C$  ;  $c - X_L < X_C$  ;  $d - X_L = X_C$

Le module de l'impédance de l'élément

$$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)} = \sqrt{R^2 + X^2} . \quad (5.63)$$

L'argument ou l'angle du déphasage  $\varphi$  entre les vecteurs de la tension et du courant

$$\operatorname{tg} \varphi = (X_L - jX_C)/R = X/R . \quad (5.64)$$

La valeur positive de cet angle signifie que la résistance réactive a le caractère inductif. En ce cas le vecteur de tension selon la phase est en avance de l'angle  $\varphi$  sur le vecteur du courant (voir fig. 5.8, b).

La valeur négative d'angle  $\varphi$  signifie que la résistance réactive a le caractère capacitif. En ce cas le vecteur de tension selon la phase est en retard de l'angle  $\varphi$  sur le vecteur du courant (voir fig. 5.8, c).

Quand  $\varphi = 0$ , les vecteurs de la tension et du courant sont en phase (voir la figure 5.8, d).

Le phénomène, quand dans un circuit en série des éléments  $R$ ,  $L$  et  $C$  la tension de la chaîne total est en phase avec son courant, est appelé **résonance en tension (résonance série)**.

Une **résonance en tension se produit lorsque la résistance réactive du circuit est égale à zéro** ( $X = 0$ ), i.e. la résistance inductive est égale à la résistance capacitive du circuit ( $X_L = X_C$ ). Dans ce cas, les tensions inductifs et capacitifs se compensent mutuellement ( $\dot{U}_C - \dot{U}_L = 0$ ) car ils sont égaux en valeur et sont à l'opposé de la phase. Les valeurs de courant et de la puissance sont maximales, de la source à la chaîne vient seulement d'énergie active.

Les amplitudes d'oscillation des puissances réactives  $p_L$  et  $p_C$  à la résonance de tension sont identiques par la valeur et sont en antiphasse. En ce qui concerne les énergies des champs électrique et magnétique, aux moments du temps, lorsque l'énergie est stocké dans le champ électrique d'un condensateur, ce stock s'effectue grâce à l'énergie du champ magnétique de la bobine. À d'autres moments du temps il a lieu le passage inverse de l'énergie du champ électrique dans le champ magnétique.

Le complexe de la puissance apparente de la chaîne examinée

$$\underline{S} = \dot{\underline{U}} \cdot \dot{\underline{I}}^* = \underline{Z} \cdot \dot{\underline{I}} \cdot \dot{\underline{I}}^* = (R + jX_L - jX_C) \cdot I^2 = R \cdot I^2 + jX_L \cdot I^2 - jX_C \cdot I^2,$$

ou 
$$\underline{S} = P + jQ_L - jQ_C, \quad (5.65)$$

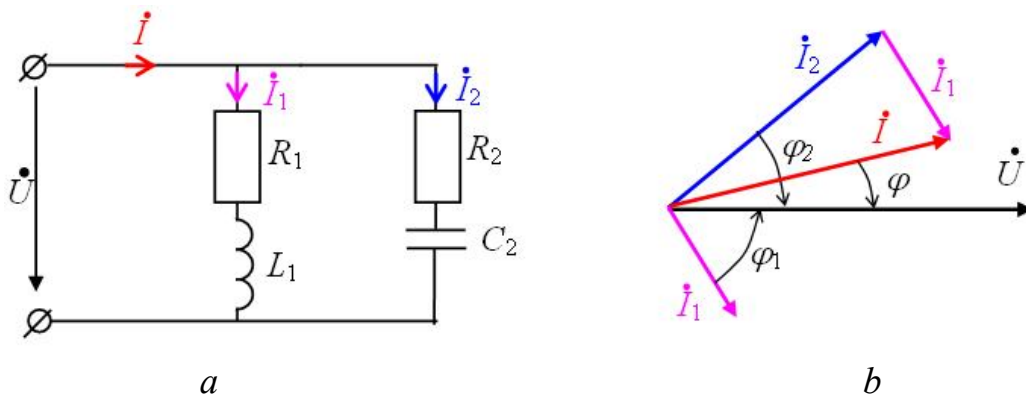
avec :

$Q_L = X_L \cdot I^2$  – puissance réactive conditionnée par la présence à la chaîne d'une inductance ;

$Q_C = X_C \cdot I^2$  – puissance réactive conditionnée par la présence à la chaîne d'une capacité.

## 5.8 Circuit de courant alternatif avec des récepteurs en parallèle

Considérons le schéma d'une chaîne, composée de deux branches parallèles (voir la figure 5.9, a), dont les paramètres  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $R_2$  et  $C_2$  sont connus. Que la tension  $U$  et la fréquence  $f$  de la source soient connus et il faut déterminer les courants, les puissances de la chaîne et sa résistance équivalente en bornes d'entrée.



**Figure 5.9** – Schéma (a) et diagramme vectoriel (b) de la chaîne, composée de deux branches parallèles

On peut commencer le calcul par le choix de la phase initiale de la tension  $\dot{\underline{U}}$ , à quoi il est commode de diriger son vecteur selon un des axes  $+1$  ou  $+j$ . Nous accepterons  $\dot{\underline{U}} = U$ , que correspond au sens du vecteur  $\dot{\underline{U}}$  selon l'axe  $+1$ .

Les paramètres définies des branches permettent d'inscrire leurs complexes des impédances :

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

et 
$$\underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} = Z_2 e^{-j\varphi_2}.$$

En connaissant les valeurs complexes  $\dot{U}$ ,  $\underline{Z}_1$  et  $\underline{Z}_2$ , on peut trouver les courants des branches, en se servant de la loi de l'Ohm sous la forme complexe:

$$\dot{I}_1 = \dot{U} / \underline{Z}_1 \quad \text{et} \quad \dot{I}_2 = \dot{U} / \underline{Z}_2 . \quad (5.66)$$

Le courant total de la partie non ramifiée de la chaîne nous définissons d'après la première loi de Kirchhoff :

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 . \quad (5.67)$$

À partir de la balance de la puissance de la chaîne, par laquelle le complexe de la puissance apparente de la source

$$\underline{S}_{source} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* \quad (5.68)$$

doit être égal à la somme des complexes des puissances apparentes de ses branches séparées :

$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 = \dot{U} \dot{I}_1^* + \dot{U} \dot{I}_2^* . \quad (5.69)$$

Nous pouvons calculer les puissances des branches comme suit :

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{Z}_1 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + jX_1 \cdot I_1^2 = P_1 + jQ_{L1}, \\ \underline{S}_2 &= \underline{Z}_2 \cdot I_2^2 = R_2 \cdot I_2^2 - jX_2 \cdot I_2^2 = P_2 - jQ_{C2}. \end{aligned}$$

La puissance totale des branches

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = P_1 + P_2 + jQ_{L1} - jQ_{C2}$$

doit être égale à la puissance, calculé par l'équation (5.68).

Pour déterminer le complexe impédances équivalentes de schéma  $\underline{Z}$  prenons l'équation (5.61) et au lieu de courants nous mettrons les valeurs exprimées par la tension  $\dot{U}$  et les résistance  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Z}_1$  et  $\underline{Z}_2$  :

$$\frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} .$$

Ce qui donne

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} . \quad (5.70)$$

Si nous avons  $n$  branches parallèles, au lieu de la formule (5.70) on peut inscrire la formule plus générale à la définition de la résistance équivalente :

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_k} . \quad (5.71)$$

Traçons le diagramme vectoriel des courants de la chaîne donnée (fig. 5.9, b). Pour un vecteur initial nous prendrons le vecteur de la tension qui est commun à toutes les branches. Nous dirigerons ce vecteur sur l'axe +1 et nous remettrons par rapport à lui les vecteurs des courants des branches  $\dot{I}_1$  et  $\dot{I}_2$ . Le vecteur du courant  $\dot{I}_1$  est en retard sur la phase du vecteur de tension de l'angle  $\varphi_1$ , et le vecteur du courant  $\dot{I}_2$  est en avance sur la phase du vecteur de la tension à l'angle de  $\varphi_2$ . Le vecteur du courant  $\dot{I}$  de la branche non ramifié égal

à la somme géométrique des vecteurs des courants des branches et il est en avance sur la phase du vecteur de tension à l'angle de  $\varphi$ .

### 5.9 Composantes actives et réactives d'une admittance et du courant

Dans les circuits du courant sinusoïdal la valeur inverse au impédance complexe  $\underline{Z}$  est appelé **admittance complexe** et est désigné par la lettre  $\underline{Y}$  :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}, \quad (5.72)$$

Comme tout nombre complexe, l'admittance complexe a une partie réelle, qu'on désigne par le symbole  $G$  et qu'on appelle **conductance**, et une partie imaginaire désignée par le symbole  $B$  et appelée **susceptance**.

Si un circuit est actif-inductif et a impédance complexe  $\underline{Z} = R + jX_L$ , alors il a **admittance complexe**

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X_L}{Z^2}, \quad (5.73)$$

ou 
$$\underline{Y} = G - jB_L, \quad (5.74)$$

où une conductance  $G$  et une **susceptance inductive**  $B_L$  s'expriment par les relations

$$G = R / Z^2 \quad \text{et} \quad B_L = X_L / Z^2. \quad (5.75)$$

Si un circuit est actif-capacitif et a impédance complexe  $\underline{Z} = R - jX_C$  alors il a **admittance complexe**

$$\underline{Y} = \frac{1}{R - jX_C} = \frac{R + jX_C}{R^2 + X_C^2} = \frac{R}{Z^2} + j \frac{X_C}{Z^2}, \quad (5.76)$$

ou 
$$\underline{Y} = G + jB_C, \quad (5.78)$$

où une **conductance**  $G$  et une **susceptance capacitive**  $B_C$  s'expriment par les relations

$$G = R / Z^2 \quad \text{et} \quad B_C = X_C / Z^2.$$

La comparaison des équations (5.73) et (5.76) montre que la conductance  $G$  et la susceptance  $B$  des chaînes actives-capacitives et actives-inductives sont définis par les formules identiques. La différence réside dans le fait que **la partie imaginaire du complexe de l'admittance est positive pour une chaîne capacitive et est négative pour une chaîne inductive**.

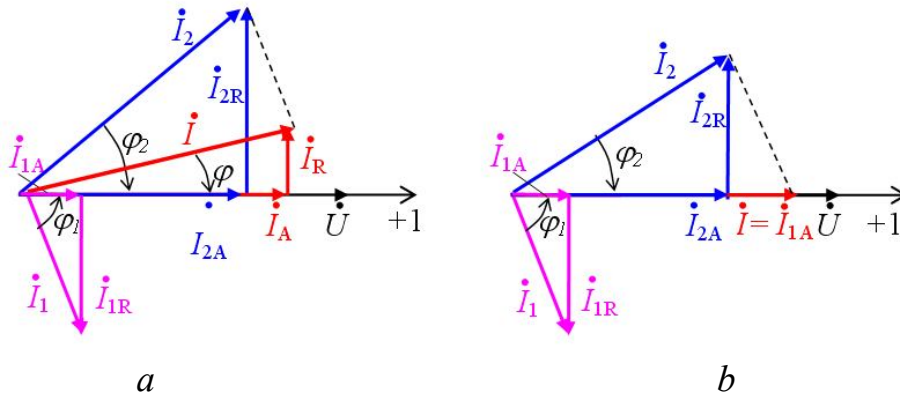
Lors de l'utilisation des diagrammes vectorielles pour l'analyse des phénomènes des circuits de courant harmonique on se sert aussi de la décomposition d'un vecteur de courant sur ses composantes – active  $\dot{I}_A$  et réactive  $\dot{I}_R$ . On peut réaliser cette décomposition graphiquement ou analytiquement.

Considérons la méthode graphique de la décomposition du courant. Prenons le schéma de la chaîne (voire la figure 5.9, a), composée de deux branches parallèles, et sur la figure 5.10, a renouvelerons le diagramme vectoriel, qui a été construit précédemment sur la figure 5.9, b.

Chacun des vecteurs du courant sur le diagramme est décomposé en deux composantes: actif, qui coïncide en phase avec le vecteur de tension, et réactif, perpendiculaire au vecteur de tension. Puisque les courants sont en phase avec la tension seulement dans les éléments actifs, et sont en retard ou en avance de phase  $\pi/2$  sur la tension seulement dans les éléments réactifs, **les composantes du courant**  $\dot{I}_A$  et  $\dot{I}_R$  on appelle **actif et réactif**.

Les modules des composantes actifs ( $I_A$ ) et réactifs ( $I_R$ ) des courants  $\dot{I}_1$  et  $\dot{I}_2$

$$\begin{aligned} I_{1A} &= I_1 \cos \varphi_1, & I_{1R} &= I_1 \sin \varphi_1, \\ I_{2A} &= I_2 \cos \varphi_2, & I_{2R} &= I_2 \sin \varphi_2. \end{aligned}$$



**Figure 5.10** – Décomposition du vecteur total du courant du circuit bifurqué sur les composantes actives et réactives

On peut utiliser les composantes du courant et de la conductibilité pour déterminer la puissance de la chaîne :

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_A = G \cdot U^2, \\ Q_L &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_L = U \cdot I_{LR} = B_L \cdot U^2, \\ Q_C &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_C = U \cdot I_{CR} = B_C \cdot U^2. \end{aligned}$$

Lors de la méthode décomposition analytique, le courant de quelque branche on représente comme la multiplication des valeurs complexes de la tension et de l'admittance :

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = (G + jB) \cdot \dot{U} = G \cdot \dot{U} + jB \cdot \dot{U} = \dot{I}_A + \dot{I}_R. \quad (5.79)$$

Dans la relation (5.79) la valeur  $\dot{I}_a = G \cdot \dot{U}$  est une **composante active**, et la valeur  $\dot{I}_R = jB \cdot \dot{U}$  – une **composante réactive du courant**.

Lors de l'analyse des régimes d'un circuit ramifié il est commode d'utiliser les composantes actives et réactives d'admittance et du courant. Nous reviendrons à titre d'exemple à la considération de la chaîne, composée de deux branches parallèles (voir la figure 5.9, a).

L'admittance complexe équivalente de cette chaîne

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 - jB_L + G_2 + jB_C,$$

ou

$$\underline{Y} = G_1 + G_2 - j(B_L - B_C) = G_{\text{equiv}} - jB_{\text{equiv}}.$$

Si susceptance de la branche inductive est plus que la susceptance de la branche capacitive ( $B_L > B_C$ ), alors

$$\underline{Y} = G_{\text{equiv}} - jB_{\text{equiv}},$$

et la chaîne est activement-inductive. Le courant dans la section non ramifiée d'une telle chaîne, est égal au courant de la source d'alimentation et est en retard de la phase sur la tension de la source. Lors de  $B_L < B_C$  la chaîne est activement-capacitive et le courant est en avance de la phase sur la tension de cette section.

Dans un circuit de couplage en dérivation des récepteurs inductifs et capacitifs (voir la figure 5.9, *a*) il y a un phénomène, quand le courant total de la chaîne (le courant du terrain non ramifié) et la tension d'entrée du circuit sont en phase. Ce phénomène est appelé **résonance en courant**.

**Les composantes réactives des courants des branches inductives et capacitives lors de la résonance en courant sont égales par la valeur et sont en contre-phase** (voir la figure 5.11, *b*). Donc, à la résonance de courants de n'importe quel circuit parallèle son courant inductif réactif  $\dot{I}_L$  et son courant réactif capacitif  $\dot{I}_C$  sont compensés mutuellement. La chaîne représente la résistance active dont la conductibilité équivalente est égale à la somme des conductibilités (conductances) des branches parallèles (fig. 5.9, *a*) :

$$\underline{Y} = G_{eqv} = G_1 + G_2.$$

La chaîne a seulement les composantes actives du courant

$$\dot{I} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a},$$

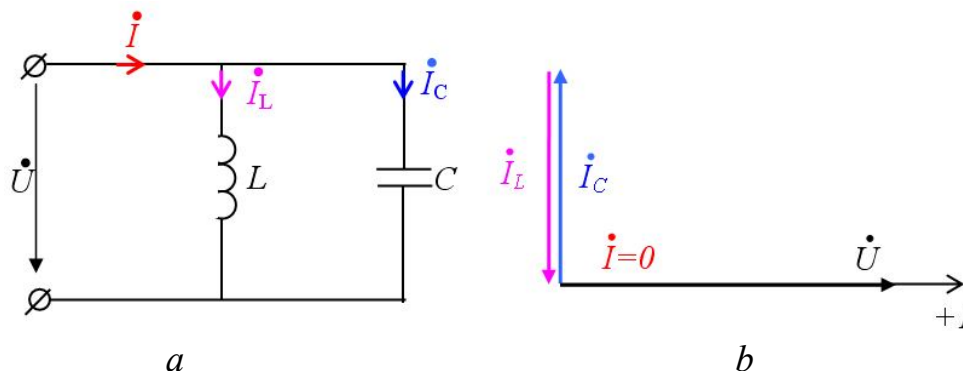
et ne consomme que l'énergie active, puisque les puissances réactives sont proportionnelles aux composantes réactives de leurs courants :

$$Q_L = U \cdot I_{LR} \quad \text{et} \quad Q_C = U \cdot I_{CR},$$

et les fluctuations de ces puissances sont en opposition de phase .

Donc, la chaîne à la résonance de courants ne consomme pas de la source de l'énergie réactive. Dans cette chaîne il a lieu l'échange mutuel entre les énergies de champ électrique et de champ magnétique. La source d'alimentation compense seulement la perte de l'énergie dans les résistances actives des branches.

Un intérêt particulier présente la chaîne de deux éléments idéaux joints en parallèle – un élément inductif et un élément capacitif (fig. 5.11, *a*). Les conditions de la résonance de courants d'une telle chaîne  $\dot{I}_{LR} = \dot{I}_{CR}$  ou  $B_L = B_C$ , ou  $1/X_L = 1/X_C$  sont réduites à la condition  $X_L = X_C$ . En raison de l'absence des résistances actives, le courant total de cette chaîne est égal au zéro ( $\dot{I} = 0$ ), bien que dans chacune des branches passe le courant  $\dot{I}_{LR} = \dot{I}_{CR}$  (fig. 5.11, *b*).



**Figure 5.11** – Schéma équivalent de couplage en parallèle de deux éléments idéaux inductifs et capacitifs (*a*) et son diagramme vectoriel (*b*)



## 5.10 Amélioration du facteur de puissance dans les circuits du courant alternatif

La plupart des consommateurs d'énergie électrique en courant alternatif représentent les charges inductives dont les courants sont en retard de la phase sur les tensions de la source d'alimentation. La puissance active de ces consommateurs

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (5.80)$$

avec les valeurs données de courant et de tension dépend encore de  $\cos\varphi$ .

Si pour le consommateur on définit sa tension  $U$  et sa puissance active  $P$ , alors le changement de  $\cos\varphi$  change le courant du consommateur. Avec la diminution de  $\cos\varphi$  du consommateur son courant augmente

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} . \quad (5.81)$$

Les générateurs, qui alimentent les consommateurs, sont calculés à une certaine **puissance nominale**  $S_n = U_n \cdot I_n$ . En prenant en compte la tension nominale  $U_n$  ils ne peuvent pas être chargés par le courant qui dépasse la valeur nominale. Par conséquent, l'augmentation du courant de consommateur à cause de la réduction de son  $\cos\varphi$  ne doit pas dépasser certaines limites. Pour le courant du générateur ne dépasse pas le courant nominal à la réduction de  $\cos\varphi$  du consommateurs, il est nécessaire de réduire sa puissance active. Dans ce cas, le générateur fonctionne à pleine charge en courant et à sous-charge en puissance active.

Pour laisser la puissance active du consommateur lors de la réduction du  $\cos\varphi$  il était possible d'installer le générateur d'une puissance plus grande pour que l'augmentation du courant en conséquence de la réduction de  $\cos\varphi$  ne dépasse pas sa valeur nominale. Dans ce cas la puissance active  $P = S_n \cdot \cos\varphi$ , dont sera chargé le générateur, fait seulement une partie de la puissance nominale  $S_n$ . Par exemple, à la réduction de  $\cos\varphi$  de 1 à 0,5 la charge du générateur fait seulement 50 % de sa puissance nominale. Ainsi,  **$\cos\varphi$  caractérise utilisation de la puissance nominale de la source, et c'est pour cela qu'il est appelé facteur de puissance.**

Le fonctionnement du consommateur avec un petit facteur de puissance, outre l'aggravation des conditions de l'utilisation économique de la source d'alimentation, amène à l'augmentation de la puissance des pertes dans la ligne de transport de l'énergie électrique de la source chez le consommateur. Si la résistance des fils de cette ligne est  $R$ , alors les pertes de puissance dans cette ligne

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} . \quad (5.82)$$

**La puissance des pertes**, comme on voit de (5.82), celui-là plus qu'est plus bas  $\cos\varphi$  d'installation. Donc, **plus bas  $\cos\varphi$  du consommateur, se passera plus cher la transmission chez lui de l'énergie électrique.**

Les **pertes de puissance**, comme on voit de (5.82), d'autant plus que le  $\cos\varphi$  d'installation est moins. Par conséquent, **plus bas  $\cos\varphi$  du consommateur, plus cher le transport chez lui de l'énergie électrique**.

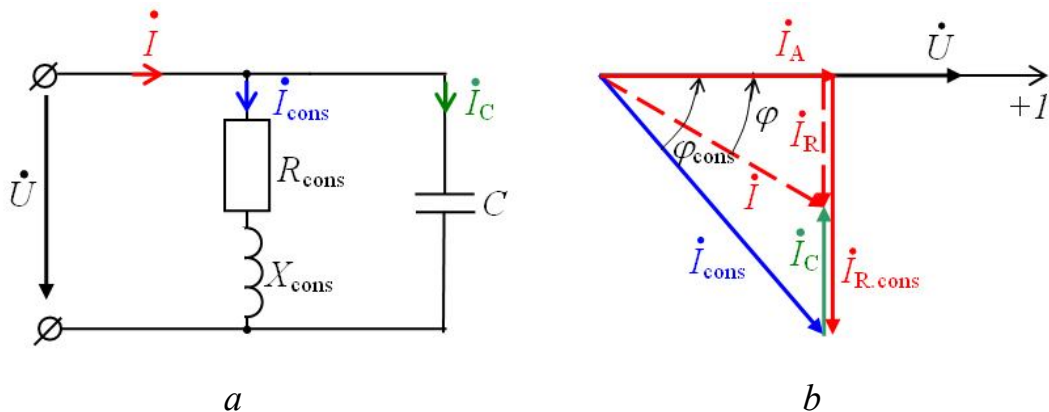
Pour augmenter les qualités économiques des installations énergétiques, prennent les mesures vers l'augmentation du facteur de puissance des consommateurs.

L'idée d'améliorer  $\cos\varphi$  est la suivante. On considère le courant total du consommateur inductif composé des composantes active et réactive. La puissance active du consommateur lors de sa tension déterminé est définie par la composante active du courant  $P = U \cdot I_a$ . C'est pourquoi si la valeur de la puissance active est déterminée la composante active du courant doit rester invariable. Dans ce cas diminuer le courant du consommateur on peut seulement aux frais de la réduction du courant réactif du consommateur inductif. On peut réaliser cela par voie de la connexion parallèle à la charge de quelque récepteur avec un courant capacitif. Un tel récepteur peut être une batterie des condensateurs spéciaux.

Nous examinerons l'exemple du compte de la capacité des batteries des condensateurs, qu'il est nécessaire d'insérer parallèlement de consommateur inductif avec  $\cos\varphi$  pour ramener le facteur de puissance de l'installation à la signification donnée  $\cos\varphi$ . La puissance active et la tension du consommateur sont donnée.

La figure 5.12, *a* montre le schéma équivalent du consommateur  $R_{\text{cons}} - jX_{\text{cons}}$  et du batterie des condensateurs, et la figure 5.12, *b* – diagramme vectoriel de ce schéma. Du diagramme on voit que pour obtenir l'angle de déphasage souhaitée, le courant de branche capacitif doit être égal à la différence de composants réactifs des courants de consommateur avant la compensation de l'angle du déphasage  $\dot{I}_{R.\text{cons}}$  et après la compensation de l'angle du déphasage  $\dot{I}_R$  :

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{R.\text{cons}} - \dot{I}_R. \quad (5.83)$$



**Figure 5.12** – Schéma équivalent d'un consommateur et d'une batterie des condensateurs (a) et son diagramme vectoriel (b)

Les composants réactifs des courants nous pouvons définir à partir de la composante active du courant du consommateur  $\dot{I}_A$  (voir la figure 5.12, *b*) :

$$I_{R.\text{cons}} = I_A \cdot \text{tg}\varphi_{\text{cons}} \quad \text{et} \quad I_R = I_A \cdot \text{tg}\varphi.$$

Par conséquent, l'expression (5.83) peut être réécrite comme suit

$$I_C = I_A \cdot (tg\varphi_{cons} - tg\varphi). \quad (5.84)$$

Le courant  $I_C$  dans cette équation peut être exprimée par la tension et de la capacité ( $I_C = U \cdot \omega C$ ), et le courant  $I_A$  – par la puissance et la tension ( $I_A = P/U$ ). Donc au lieu de (5.84) nous recevrons une autre égalité :

$$U \cdot \omega C = \frac{P}{U} (tg\varphi_{cons} - tg\varphi).$$

D'où on obtien l'équations cherchée de la capacité de batterie des condensateurs :

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (tg\varphi_{cons} - tg\varphi). \quad (5.85)$$

D'habitude à l'aide des batteries des condensateurs on réalise la compensation de l'angle du déphasage jusqu'aux significations  $\cos\varphi$  0,9–0,95.

### Conclusions principales

1. La valeur moyenne de la puissance dans un circuit est égale à sa puissance active.
2. À n'importe quelle sens du courant dans un élément résistif l'énergie entre de la source à la chaîne et se transforme en énergie thermique.
3. Le vecteur de la tension d'une bobine idéale est en avance de l'angle du déphasage égal  $\pi/2$  sur le vecteur du courant.
4. Dans un circuit d'une bobine idéal il y a une oscillation continue de l'énergie entre la source et le champ magnétique de la bobine sans dépenses d'énergie de la source.
5. Le vecteur de la tension d'un condensateur idéal est en retard de l'angle du déphasage égal  $\pi/2$  sur le vecteur du courant.
6. Dans un circuit d'un condensateur idéal il y a une oscillation continue de l'énergie entre la source et le champ électrique du condensateur sans dépenses d'énergie de la source.
7. La puissance active de la chaîne est égale au produit des valeurs efficaces de la tension et du courant sur le cosinus de l'angle du déphasage entre eux.
8. La puissance complète caractérise l'amplitude des oscillations de puissance environ de la valeur moyenne de la puissance.
9. La puissance réactive caractérise l'amplitude des fluctuations de puissance des échanges d'énergie entre la source et le champ magnétique de la bobine (le champ électrique d'un condensateur).
10. Lorsque la résistance inductive de la chaîne est égale à la résistance capacitive connectée avec elle en série dans le circuit se produit une résonance de tension, à qui le courant et la puissance sont maximales et de la source à la chaîne vient seulement l'énergie active.

11. Lorsque la résistance inductive de la chaîne est égale à la résistance capacitive connectée avec elle en parallèle dans le circuit se produit une résonance de courants, à qui le courant total aux chaînes et la tension à son entrée sont en phase et la chaîne ne consomme pas de la source l'énergie réactive.

12. Le facteur de puissance  $\cos\varphi$  caractérise utilisation de la puissance nominale de la source.

### Questions pour la maîtrise de soi

1. À quels éléments du circuit électrique se produit de manière irréversible, la conversion de l'énergie électrique ?

2. Expliquez, pourquoi au courant continu l'insertion dans une chaîne d'un condensateur est équivalent de la coupure de courant, et au courant alternatif la chaîne reste fermé (le courant passe à travers la capacité) ?

3. Écrivez l'expression pour les valeurs instantanées du courant dans la chaîne comprenant les éléments  $R$  et  $L$  connectés en série, si on met aux bornes de la chaîne la tension  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ .

4. Écrivez l'expression pour les valeurs instantanées du courant dans la chaîne comprenant les éléments  $R$  et  $L$  connectés en parallèle, si on met aux bornes de la chaîne la tension  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ .

5. Écrivez l'expression pour les valeurs instantanées de la tension aux bornes de la chaîne, composée d'une bobine dont la résistance  $R$  et l'inductance  $L$ , si la valeur instantanée du courant  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ . Tracer le diagramme vectoriel de cette chaîne.

6. Une bobine, dont les paramètres  $R$  et  $L$ , est connectée en parallèle avec un condensateur de capacité  $C$ . La tension aux bornes de la chaîne  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ . Écrivez l'expression pour les valeurs instantanées du courant dans la partie non ramifiée de la chaîne.

7. Quels sont les angles de déphasage entre les tensions des éléments  $R$ ,  $L$  et  $C$  connectés en série ?

8. Quels sont les angles de déphasage entre les tensions des éléments  $R$ ,  $L$  et  $C$  connectés en parallèle ?

9. Définissez les conditions de résonance de tension dans une chaîne et tracez le diagramme vectoriel de ce cas.

10. Écrivez la loi de l'Ohm et les lois de Kirchhoff sous la forme complexe.

11. Prouvez que dans un circuit de courant alternatif dont quelques éléments sont connectés en série peuvent être les conditions dans lesquelles la tension à l'un des éléments dépassera la tension d'entrée du circuit.

12. Prouvez que dans un circuit de courant alternatif dont quelques éléments sont connectés en parallèle peuvent être les conditions dans lesquelles le courant dans quelque branche excédera le courant de la branche non ramifié.

13. Inscrivez l'expression pour la résistance équivalente complexe pour le couplage mixte des résistances.

14. Tracerez les triangles des résistances et des conductances et faites-en des formules de transition des résistances en conductances et à l'inverse.

15. Écrivez la condition de résonance de courants, exprimé par les résistances des branches parallèle.

16. Dessinez le triangle des puissances et écrivez les formules pour les côtés de ce triangle.

17. Tracerez le graphique de la puissance instantanée d'un circuit lors de différents récepteurs (actif, inductif, capacitif, mélangé).

18. Ce qui caractérise la puissance instantanée de la chaîne ? Prouvez que la puissance instantanée peut recevoir des valeurs à la fois positives et négatives.

19. Pourquoi et comment on cherche à renforcer le facteur de puissance dans les circuits électriques ?

## Chapitre 6 : CIRCUITS ÉLECTRIQUES TRIPHASÉ

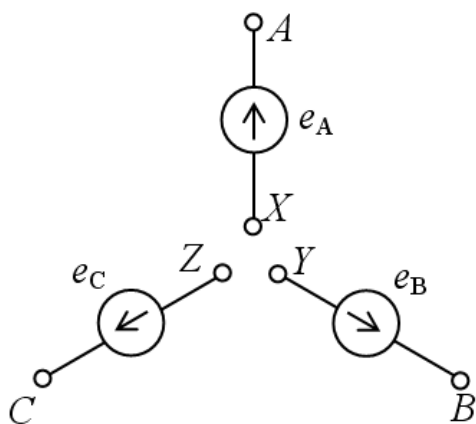
**Notions clés :** phase du réseau triphasé,  $f$  ; système triphasé de la f.e.m.,  $m$  ; système symétrique triphasé,  $m$  ; ordre des phases direct (inverse),  $m$  ; neutre,  $m$  ; f.e.m. simples (composées),  $f$   $pl$  ; connexion en étoile (triangle),  $f$  ; charge symétrique,  $f$  ; réseau triphasé à quatre conducteurs,  $m$  ; puissances active (réactive, apparente, complexe) en triphasé,  $f$ .

### 6.1 Termes et notions de base

Le groupement de quelques chaînes semblables selon la structure du courant sinusoïdal d'une fréquence avec les sources indépendantes de l'énergie à une chaîne est largement appliqué dans la technique. Les chaînes unies du courant sinusoïdal il convient d'appeler **les phases**, et le système uni des chaînes – **le système polyphasé**. Ainsi, dans le génie électrique le terme «la phase» **est utilisée à deux sens divers** : premièrement, c'est **le paramètre du procès périodique**, et deuxièmement – **le nom du composant du système polyphasé des chaînes du courant sinusoïdal**. La plus grande diffusion est reçue le **système triphasé**.

Le système triphasé était inventé et élaboré dans tous les détails, y compris le transformateur triphasés et le moteur à induction, par l'ingénieur éminent russe M. O. Dolivo-Dobrovolsky dans les années 1880. À présent pour la transmission et la distribution de l'énergie dans majorité des cas on applique les systèmes triphasés.

**Un avantage très important du système triphasé est aussi la simplicité exclusive et le prix bas des moteurs à induction triphasés.** Outre le système triphasé la signification pratique a le système de six phases, par exemple dans les installations du redressement du courant alternatif. Dans certaines installations de l'automatique on applique aussi le système biphasé.



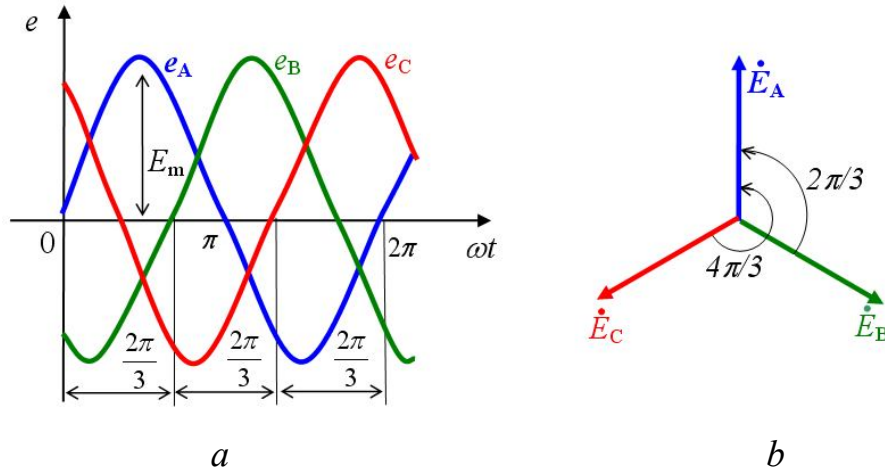
**Figure 6.1** – Désignation du générateur triphasé

**Pour la désignation des phases du système triphasé on applique les lettres de l'alphabet latin.** La première phase a la désignation A ou a – le début de la phase, X ou x – la fin de la phase (les majuscules se rapportent à la source, et les minuscules à la charge). Toute la phase on appelle la phase A, les deux autres – la phase B et la phase C. La désignation du **générateur triphasé** est montré sur la figure 6.1.

Pour le début de la phase on prend la borne, à travers laquelle le courant entre à la chaîne extérieure à sa signification positive.

On peut joindre les fins des phases de la source l'un avec l'autre, alors la f.e.m. totale agira dans la chaîne extérieure. Un tel système s'appelle **lié**.

**Un système triphasé de la f.e.m. s'appelle symétrique**, si les fréquences et les amplitudes des f.e.m. de chacun des phases sont identiques, sinusoïdales et sont déplacés l'un par rapport à l'autre à un angle de  $2\pi/3$ , c'est-à-dire à  $120^\circ$  (fig. 6.2).



**Figure 6.2** – Représentation graphique (a) et vectoriel (b) du système de la f.e.m. triphasé et symétrique

Sous la forme analytique les valeurs de la f.e.m. instantanées et efficaces induites dans les phases s'inscrivent de façon suivante :

$$\begin{cases} e_A = E_{mA} \sin \omega t; & \dot{E}_A = E; \\ e_B = E_{mB} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); & \dot{E}_B = E \cdot e^{-j2\pi/3}; \\ e_C = E_{mC} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}); & \dot{E}_C = E \cdot e^{-j4\pi/3} = E \cdot e^{j2\pi/3}. \end{cases} \quad (6.1)$$

Comme on voit de la figure 6.2, a, en système symétrique triphasé la somme des valeurs instantanées des f.e.m. simples est égale au zéro à n'importe quel moment du temps

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (6.2)$$

Par analogie, on peut inscrire pour les valeurs efficaces des vecteurs :

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (6.3)$$

Sur le diagramme vectoriel (fig. 6.2, b) la phase A est en avance sur la phase B, et la phase B – sur la phase C. Cet ordre des phases ABC s'appelle **un ordre direct**, et l'ordre des phases ACB s'appelle **un ordre inverse**. On définit l'ordre des phases par un appareil spécial – l'indicateur d'ordre des phases.

Comme une source d'énergie électrique triphasée on utilise généralement les générateurs synchrones triphasés, qui convertissent l'énergie mécanique à l'énergie électrique, dont chacune des trois bobinages de l'ancre est une source de f.e.m. sinusoïdale monophasée.

Aux consommateurs de l'énergie électrique triphasés on rapporte les moteurs triphasé synchrone et asynchrone et les transformateurs (avec une charge), les fourneaux électriques, les appareils de l'éclairage électrique etc.

Il y a des divers moyens de connection des phases des sources d'alimentation triphasées et les consommateurs triphasés de l'énergie électrique. Les plus répandues sont les couplages « Étoile » et « Triangle ». De plus les moyens de la liaison des phases des sources et des phases des consommateurs dans les systèmes triphasés peuvent être divers. D'habitude les phases de la source sont couplés en étoile, les phases des consommateurs on connecte ou en étoile, ou en triangle.

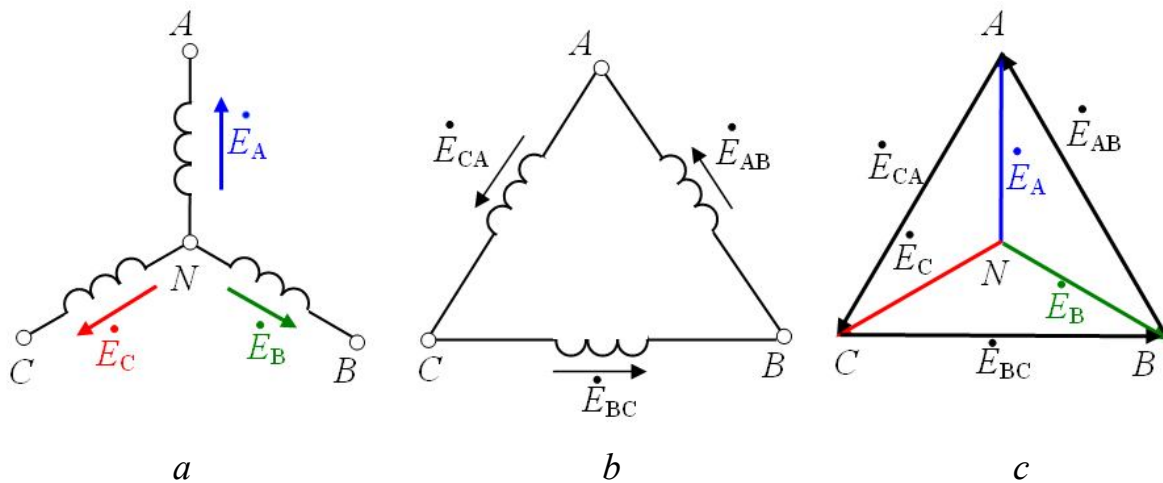
## 6.2 Couplage des enroulements de l'alternateur triphasé

Les phases du bobinage du générateur triphasé peuvent être connectés en l'étoile (fig. 6.3, a) ou en triangle (fig. 6.3, b).

Lors de la connexion en étoile les extrémités des phases on unisse à un seul point N (fig. 6.3, a), qui est appelé **le zéro** ou **le neutre**. La charge peut être raccorder aux bornes d'utilisation N – A, N – B, N – C ou A – B, B – C, C – A.

On distingue les **f.e.m. simples**  $E_A, E_B, E_C$  et les **f.e.m. composées**  $E_{AB}, E_{BC}, E_{CA}$ , qui, comme le montre la figure 6.3, b, sont liés entre eux par des expressions :

$$\begin{cases} \dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B; \\ \dot{E}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C; \\ \dot{E}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{cases} \quad (6.4)$$



**Figure 6.3** – Schémas de connection des enroulements de l'alternateur triphasé  
a – « Étoile », b – « Triangle », c – diagramme vectoriel

Dans un système symétrique, le système des f.e.m. composées est symétrique  $\dot{E}_{AB} + \dot{E}_{BC} + \dot{E}_{CA} = 0$ . De plus le rapport entre les f.e.m. simples ( $E_{\text{simpl}}$ ) et les f.e.m. composées ( $E_{\text{comp}}$ ) a vue

$$E_{\text{comp}} = \sqrt{3} E_{\text{simpl}}. \quad (6.5)$$



Lors de la connexion des phases de la source dans le triangle on connecte la charge à ses sommets (fig. 6.3, *c*). Dans ce cas les f.e.m. et les tensions simples et composées se trouvent égales:  $E_{\text{simpl}} = E_{\text{comp}}$ ;  $U_{\text{simpl}} = U_{\text{comp}}$ . Ce type de connexion est possible seulement dans le cas où la source est symétrique. Dans ce cas les phases forment le contour fermé dont le courant est nulle.

Pratiquement il est impossible d'accomplir tous les enroulements identique, i.e. la f.e.m. est toujours asymétrique. Et, comme une conséquence, il y a des courants égalisateurs qu'est toujours indésirable. C'est pourquoi pratiquement toujours (à quelques rares exceptions) les enroulements du générateur joignent par l'étoile.

Les récepteurs d'énergie électrique peuvent être connectés en triangle et en étoile. Généralement on définit la valeur de la tension composée de la source. La norme prévoit une échelle de la tension composée: 127, 220, 380, 500, 660 V.

### 6.3 Couplage des consommateurs triphasé en étoile

Lors de la connexion des phases d'une source d'alimentation triphasée ou d'un consommateur de l'électricité « en Étoile » (fig. 6.4) les extrémités des phases de la source  $X, Y, Z$  sont unies dans le point commun neutre  $N$  et le début des phases  $A, B, C$  sont connectés aux fils correspondants composés  $Aa, Bb, Cc$ . De la même manière lors de la connexion consommateurs triphasé on connecte dans le point neutre  $n$  les extrémités de ses phases  $x, y, z$ , et les débuts des phases  $a, b, c$  on connecte aux fils composés.

Les tensions  $U_A, U_B, U_C$  entre les débuts et les fins des phases de la source l'alimentation sont ses tensions simples et les tensions  $U_a, U_b, U_c$  entre les débuts et les fins des phases du consommateur – les tensions simples du consommateur. Les tensions  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  entre les débuts des phases de la source et les tensions  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  entre les débuts des phases du consommateur sont les tensions composées.

Sur le schéma de la figure 6.4 est montré les sens conventionnelles positives des tensions simples et composées. **Les courants composés**  $I_{\text{comp}}$  dans les lignes nourrissant ( $I_A, I_B, I_C$ ) lors de la connexion d'une source d'alimentation triphasée et d'un consommateur triphasé en étoile, dont les sens conventionnelles positives sont montrés sur la figure 6.4, sont à la fois **les courants simples**  $I_{\text{simpl}}$ , passant par les phases de consommateur ( $I_A, I_B, I_C$ ). C'est pourquoi, dans le cas examiné, en présence du système symétrique triphasé à la liaison des phases du consommateur par « Étoile » les courants composés se trouvent égaux aux courants simples

$$I_{\text{simpl}} = I_{\text{comp}} . \quad (6.6)$$

Les sources d'alimentation triphasées pratiquement toujours exécutées symétriques. Dans ce cas les valeurs efficaces des f.e.m.  $E_A = E_B = E_C = E_{\text{simpl}}$ , et aussi des tensions simples des phase  $U_A = U_B = U_C = U_{\text{simpl}}$  sont respectivement égaux et décalées l'un par rapport à l'autre dans l'angle de phase  $2\pi/3$ . Lors de cette approche les résistances des phases complexes, actives et inductives sont égales en conséquence, c'est-à-dire :  $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_{\text{ph}}$ ;  $R_A = R_B = R_C = R_{\text{ph}}$ ;

$X_A = X_B = X_C = X_{ph}$ . Les valeurs des facteurs de puissance aussi sont égales :  $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = \cos\varphi_s$ .

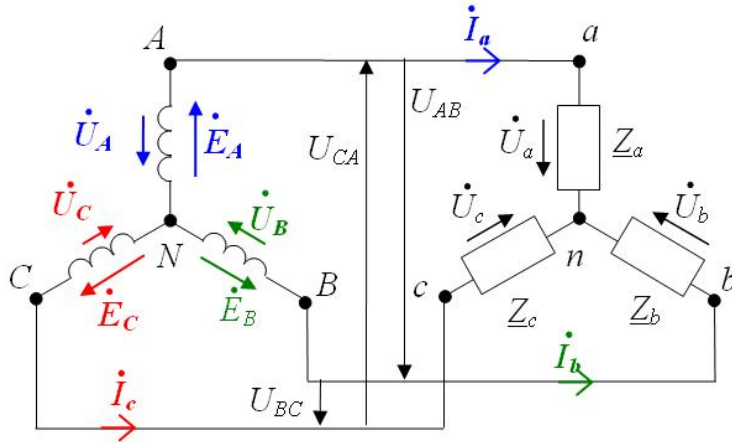


Figure 6.4 – Connexion des sources et des consommateurs en « étoile – étoile »

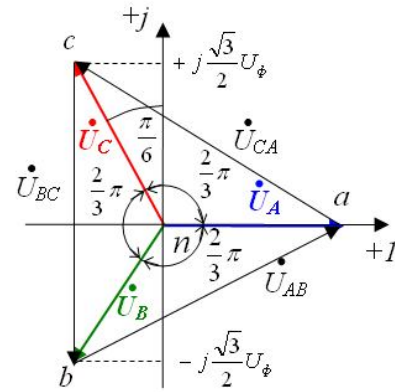


Figure 6.5 – Diagramme vectoriel des tensions simples et composées

Les consommateurs triphasés de l'énergie électrique peuvent être symétriques et asymétriques. Pour les consommateurs symétriques sont justes les rapports reçus pour les sources d'alimentation triphasées symétriques. En ce cas (voir la figure 6.4) :  $U_a = U_b = U_c = U_{simpl}$  ;  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{comp}$  ;  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{ph}$  ;  $R_a = R_b = R_c = R_{ph}$  ;  $X_a = X_b = X_c = X_{ph}$  ;  $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi_{ph}$ . La relation entre les tensions simples et composées est défini par l'expression

$$U_{comp} = \sqrt{3}U_{simpl}. \quad (6.7)$$

Pour les consommateurs **triphases asymétriques** pas tous ces ratios sont respectés.

Lors de l'analyse des circuits électriques triphasés on utilise largement la méthode des nombres complexes. À son aide on peut effectuer des calculs dont est impossible d'effectuer par d'autres méthodes.

La figure 6.5 montre sur le plan des nombres complexes le diagramme vectoriel les tension simples  $\dot{U}_a$ ,  $\dot{U}_b$ ,  $\dot{U}_c$  et composées  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$  d'un consommateur d'électricité, où le vecteur de tensions est envoyé par l'axe réelle dans le sens positif. Compte tenu de cela les tension simples d'un consommateur triphasé symétrique peuvent être représentées dans la notation complexe :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_a = U_a = U_{simpl} = \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}} ; \\ \dot{U}_b = U_b \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{simpl} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; \\ \dot{U}_c = U_c \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{simpl} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right). \end{array} \right. \quad (6.8)$$

Conformément aux sens positives des tensions simples et composées acceptées conventionnelles (voir fig. 6.4), les tensions composées du consommateur de l'énergie

électrique sont définis par les équations faites dans la notation complexe pour les contours correspondants fermés d'après la deuxième loi de Kirchhoff :

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b ; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c ; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a .$$

Du diagramme vectoriel (fig. 6.5) on voit que les tensions composées, ainsi que les tensions simples, sont décalés l'un par rapport à l'autre dans l'angle de phase  $2\pi/3$ . Dans ce cas, pour un système symétrique triphasé la somme vectorielle des tensions simples est  $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$ , de même que la somme des tension composées est  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ .

En tenant compte des expressions mentionnées ci-dessus les tensions composées du consommateur pour le système symétrique peuvent être présentés par les relations suivantes :

$$\dot{U}_{AB} = U_{\text{comp}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) ; \quad \dot{U}_{BC} = -j U_{\text{comp}} ; \quad \dot{U}_{CA} = U_{\text{comp}} \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) .$$

On peut inscrire les expressions analogues et pour une source d'alimentation triphasée symétrique lors de la connexion de ses phases par « étoile ».

Si nous néglignons des résistances des câbles, reliant la source l'alimentation triphasée avec trois phases consommateur d'énergie, alors les tension composées du consommateurs seront égaux aux tensions correspondant simples de la source d'alimentation :  $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}$ .

Lors de couplage des phases du consommateur « en étoile » et la charge symétrique (équilibrée) les courants complexes simples on définisse à partir des expressions inscrites d'après la loi d'Ohm pour une section de la chaîne :

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} ; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} ; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} .$$

Puisque les tensions simples et les impédances de toutes les phases des consommateurs sont égaux, les courants simples et les courants composés seront aussi égaux :

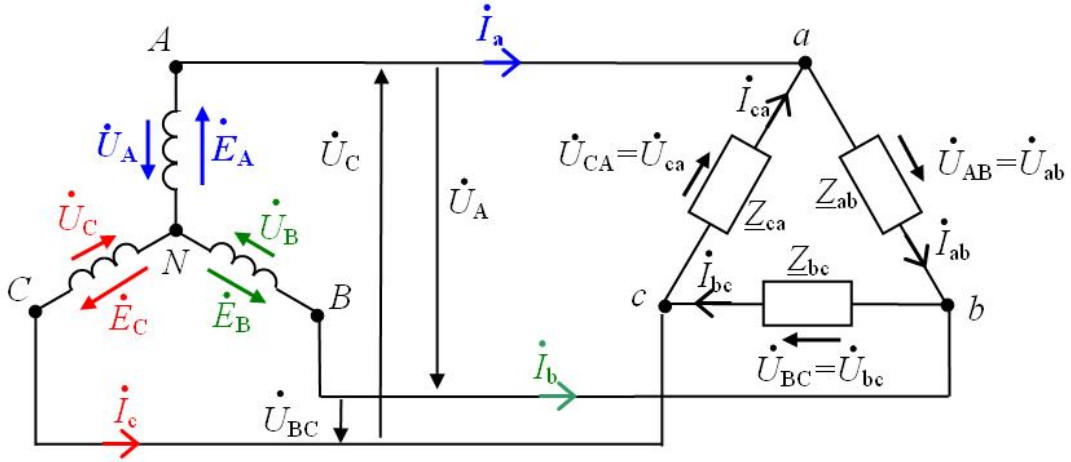
$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{simpl}} = I_{\text{comp}} . \quad (6.9)$$

## 6.4 Couplage des consommateurs triphasés en triangle

Dans les systèmes triphasés à côté de la liaison des consommateurs triphasés « en étoile » on applique la connexion des phases « en triangle ». Nous remarquerons, que la connexion des phases de la source (en étoile ou en triangle) dans ce cas n'a pas d'importance.

**La connexion**, dont le début d'une phase d'un consommateur d'électricité (ou la source d'alimentation) se lie avec la fin de son autre phase, dont le début est connecté à la fin de la troisième phase, et le début troisième phase – avec la fin de la première phase (de plus les débuts de toutes les phases sont connectés aux fils correspondants composés), s'appelle **le triangle**.

Lors de couplage « triangle », comme on peut le voir à partir du schéma (fig. 6.6), les tensions simples chez le consommateur sont égales aux tensions composées ( $U_{\text{simpl}} = U_{\text{comp}}$ ).



**Figure 6.6** – Couplage des consommateurs en « triangle »

Si nous négligeons les résistances des câbles, alors les tensions composées du consommateur seront égales aux tensions correspondant de la source d'alimentation :

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} ; \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} ; \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} .$$

Pour un système d'alimentation symétrique :

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{simpl}} = U_{\text{comp}} . \quad (6.10)$$

Le diagramme vectoriel des tensions dans le plan complexe à l'alimentation symétrique quand la charge est active-inductive ( $\varphi > 0$ ) est représentée sur la figure 6.7. Ici la tension complexe composée  $\dot{U}_{ab}$  est dirigée selon l'axe positif réelle du plan complexe. Alors les tensions complexes composées on inscribe sous la forme suivante :

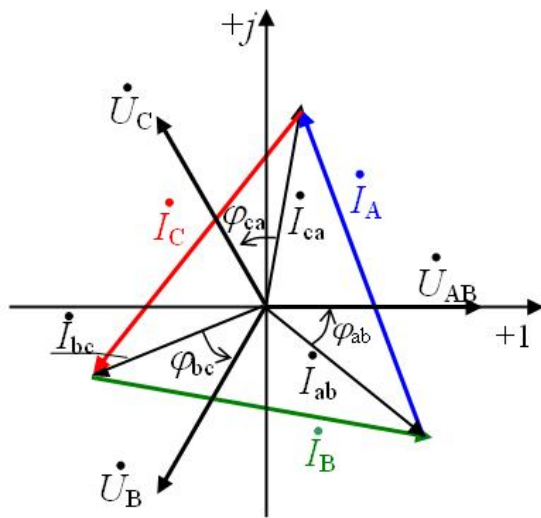
$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = U_{ab} = U_{\text{comp}} ; \\ \dot{U}_{bc} = U_{bc} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{simpl}} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; \\ \dot{U}_{ca} = U_{ca} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{comp}} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) . \end{cases} \quad (6.11)$$

Le rapport entre les courants composées et les courants simples lors de couplage d'un consommateur d'électricité en triangle et à la charge symétrique on définit à partir d'équations composées pour les courants conformément à la première loi de Kirchhoff pour les nœuds  $a$ ,  $b$ ,  $c$  de la ramification de la chaîne électrique (voir la figure 6.6) :

$$\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0 ; \dot{I}_B + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0 ; \dot{I}_C + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0 .$$

En cas de la charge symétrique les courants composés  $I_A = I_B = I_C$  et les courants simples  $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$ . L'angle de déphasage entre les phases des

courants et des tensions  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}$ , car, dans ce cas, le facteur de puissance  $\cos\varphi_{ab} = \cos\varphi_{bc} = \cos\varphi_{ca}$ .



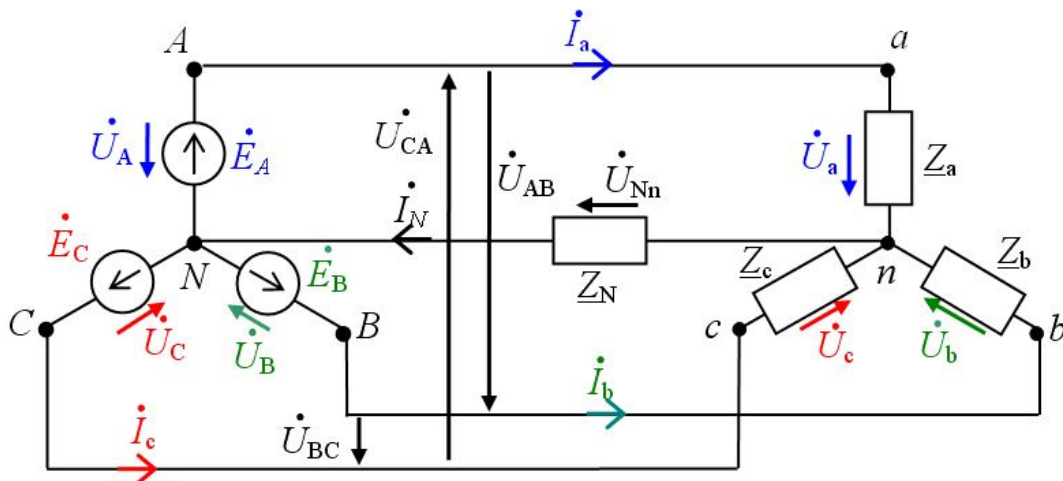
**Figure 6.7** – Diagramme vectoriel des courants et des tensions d'un consommateur connecté en « triangle »

Conformément à ces équations sur la figure 6.7 on construit le diagramme vectoriel des courants simples et composés du consommateur symétrique triphasé, dont il suit que lors de la connexion des phases triphasé symétrique des consommateurs en « triangle » entre les courants composés et simples a lieu le rapport

$$I_{\text{comp}} = \sqrt{3} I_{\text{simp}}. \quad (6.12)$$

## 6.5 Réseaux électriques triphasé à quatre fils

En réseaux électriques triphasés à quatre fils en outre des fils reliant les débuts des phases de la source d'alimentation et du consommateur de l'électricité, il y a également un fil neutre qui relie le point neutre N de la source au point neutre n du consommateur (fig. 6.8), de telle façon qu'on a la symétrie des tensions de phase de la source et du consommateur (système équilibré), car le fil neutre aligne les potentiels des points neutres N et n.



**Figure 6.8** – Réseaux électriques triphasé à quatre fils

Les systèmes triphasé à quatre fils d'alimentation des consommateurs de l'électricité ont reçu une large application dans les réseaux de distribution d'entreprises industrielles, les bâtiments habités et civils. Ils permettent de recevoir deux tensions, distinguant sur  $\sqrt{3}$  – la tension simple  $U_{\text{simp}}$  et la tension

composé  $U_{\text{comp}} = \sqrt{3} U_{\text{simpl}}$ . Aux charges mixtes de force et d'éclairage les consommateurs de force de l'énergie électrique se nourrissent des tensions composées  $U_{\text{comp}} = 660 ; 380 ; 220 \text{ V}$ . Pour une charge d'éclairage on utilise les tensions simples  $U_{\text{simpl}} = 220 ; 127 \text{ V}$ .

***Dans les réseaux électriques à quatre fils les phases de la source et les phases du consommateur on connecte toujours en « étoile ».***

En cas d'une charge asymétrique (déséquilibré), les résistances complexes des phases du consommateur ne sont pas identiques ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ), et la tension complexe ( $U_{nN}$ ), agissant entre les points neutres  $N$  et  $n$ , on définit par la méthode de deux noeuds

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (6.13)$$

où :

$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  – les f.e.m. complexe de la source d'alimentation ;

$\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$  – admittance complexe des phases du consommateur et le conducteur neutre.

En cas de la charge symétrique (équilibré)  $Z_a = Z_b = Z_c$  la somme des courants complexes dans le point  $n$  de la ramifications de la chaîne, inscrit conformément à la première loi de Kirchhoff :  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N = 0$ , et le courant dans le fil neutre  $\dot{I}_N = 0$ . De plus la tension agissant entre les points neutres  $\dot{U}_{nN} = \underline{Z}_N \dot{I}_N = 0$ .

En négligeant la résistance intérieure de la source d'alimentation symétrique et en prenant en considération que la f.e.m.  $E_A = E_B = E_C = E_{\text{simpl}} = \sqrt{3} U_{\text{comp}}$ , la tension complexe, agissant entre les points neutres, on définit à partir de l'expression

$$U_{Nn} = \frac{U_n (\underline{Y}_a + a^2 \underline{Y}_b + a \underline{Y}_c)}{\sqrt{3} (\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N)}, \quad (6.14)$$

où  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$ ,  $a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$  – les multiplicateurs (opérateurs) orientables.

On trouve les tensions complexes simples du consommateur d'énergie électrique des équations faites d'après la deuxième loi de Kirchhoff pour les contours correspondants fermés du système (fig. 6.9) :

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN}.$$

De plus les courants complexes simples du consommateur on définit d'après la loi de l'Ohm pour les terrains correspondants de la chaîne :

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Le courant complexe dans le fil neutre on trouve conformément à l'équation faite d'après la première loi de Kirchhoff pour le point neutre  $n$  de la chaîne :

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

En cas de la charge symétrique les tensions simples :  $U_a = U_b = U_c = U_{\text{simpl}}$ , alors

$$U_{\text{simpl}} = \frac{U_{\text{comp}}}{\sqrt{3}}; \quad I_A = I_B = I_C = I_{\text{simpl}} = \frac{U_{\text{ph}}}{Z_{\text{ph}}} = \frac{U_{\text{comp}}}{\sqrt{3}Z_{\text{ph}}}.$$

En cas de rupture du fil neutre son impédance  $\underline{Z}_N = \infty$  et son admittance  $\underline{Y}_N = 0$ .

En cas d'asymétrie de la charge du consommateur de l'énergie électrique ( $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ ) sur le diagramme vectoriel il y a un déplacement du point neutre n du consommateur en ce qui concerne le point neutre N de la source ce qu'amène au croisement des tensions simples du consommateur. À la suite, sur une des phases du consommateur la tension sera plus que sur les autres. Ce mode est inadmissible en plusieurs cas, en particulier en cas d'alimentation de la charge d'éclairage, quand certains appareils d'éclairage se trouvent sous tension, plus petit que nominal, et les autres – sous tension plus grand que nominal, ce qui peut provoquer une panne prématurée des appareils d'éclairage. C'est pourquoi, **dans le fil de neutre d'une réseau à quatre fils on interdit l'installation des fusibles ou des interrupteurs** (fig. 6.10), puisque au fil neutre déconnecté les tensions des phases peuvent devenir inégaux. En conséquence, la tension de certaines phases peut être inférieure à la valeur nominal, et la tension d'autres phases – plus que la valeur nominal. Par voie de conséquence, par exemple dans les chaînes des installations d'éclairage sera observé l'incandescence faible des lampes dans les phases dont la tension est baissée et l'incandescence augmentée et brûlage prématuré des lampes dans les phases avec une tension plus élevée. Le brûlage d'un des fusibles de ligne amènera à l'arrêt des électrorécepteurs de cette ligne.

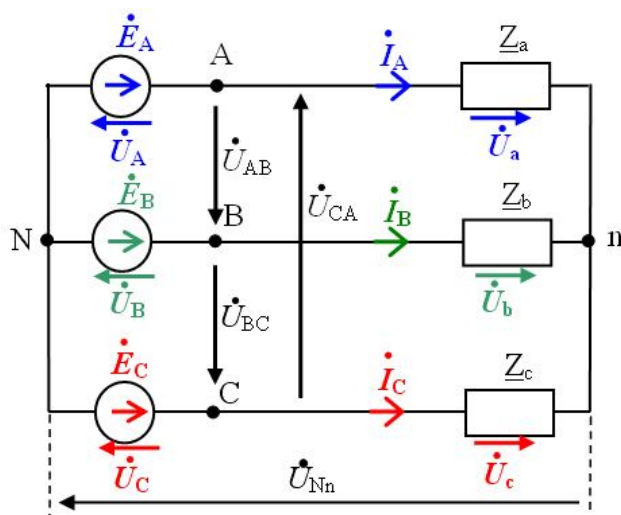


Figure 6.9 – Schéma équivalent

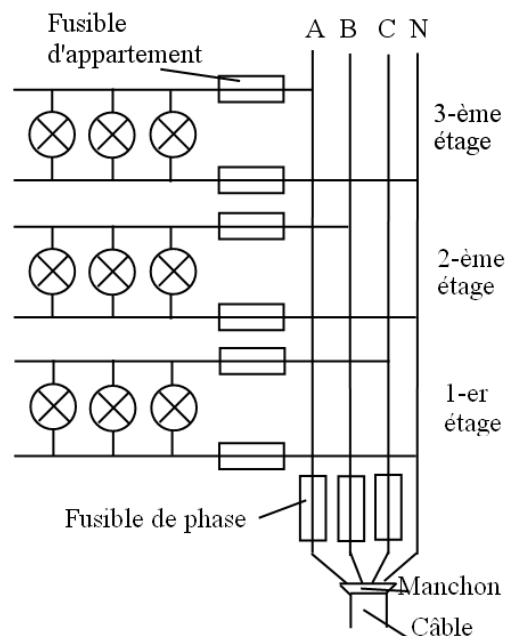


Figure 6.10 – Réseau électrique à quatre fils d'une maison

## 6.6 Puissance active, réactive et apparente du réseau électrique triphasé

Sous *la puissance active (réactive, apparente) du système triphasé on comprend la somme des puissances actives (réactives, apparentes) de toutes les phases de la source de l'énergie, égal à la somme des puissances actives (réactives, apparentes) de toutes les phases du récepteur.*

Un système triphasé à quatre fils assure le consommateur de l'énergie électrique par l'alimentation symétrique. En ce cas les puissance actives, réactives et apparentes peuvent être définies selon les formules suivantes en tenant compte du signe des résistances réactives :

$$\begin{cases} P = I_A^2 R_a + I_B^2 R_b + I_C^2 R_c = I_A \cdot U_a \cdot \cos \varphi_a + I_B \cdot U_b \cdot \cos \varphi_b + I_C \cdot U_c \cdot \cos \varphi_c, \\ Q = I_A^2 \cdot X_a + I_B^2 \cdot X_b + I_C^2 \cdot X_c = I_A \cdot U_a \cdot \sin \varphi_a + I_B \cdot U_b \cdot \sin \varphi_b + I_C \cdot U_c \cdot \sin \varphi_c, \\ S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{cases} \quad (6.15)$$

avec :  $\cos \varphi_a = R_a / Z_a$  ;  $\cos \varphi_b = R_b / Z_b$  ;  $\cos \varphi_c = R_c / Z_c$  ;  
 $\sin \varphi_a = X_a / Z_a$  ;  $\sin \varphi_b = X_b / Z_b$  ;  $\sin \varphi_c = X_c / Z_c$ .

Pour une charge symétrique nous aurons :

$$\begin{cases} P = 3I_{\text{simpl}}^2 R_{ph} = \sqrt{3}U_{\text{comp}} I_{\text{comp}} \cos \varphi_{ph} ; \\ Q = 3I_{\text{simpl}}^2 X_{ph} = \sqrt{3}U_{\text{comp}} I_{\text{comp}} \sin \varphi_{ph} ; \\ S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{comp}} I_{\text{comp}}, \end{cases} \quad (6.16)$$

où  $\cos \varphi_{ph} = R_{ph} / Z_{ph}$  et  $\sin \varphi_{ph} = X_{ph} / Z_{ph}$ .

Pour calculer des chaînes complexes du courant alternatif on utilise la notion de *la puissance apparente complexe de la chaîne triphasée*, qui est examinée comme *la somme des puissances apparentes complexes de toutes les phases de la source de l'énergie égale à la somme des puissances apparentes complexes de toutes les phases du récepteur.*

Dans la notation complexe la puissance complexe de la chaîne électrique triphasée :

$$\dot{S} = P \pm jQ. \quad (6.17)$$

On peut définir la puissance apparente de chacun des phases du consommateur par les formules :

$$\begin{cases} \dot{S}_a = P_a \pm jQ_a = \dot{U}_a \cdot I_a^* ; \\ \dot{S}_b = P_b \pm jQ_b = \dot{U}_b \cdot I_b^* ; \\ \dot{S}_c = P_c \pm jQ_c = \dot{U}_c \cdot I_c^* ; \end{cases} \quad (6.18)$$

où  $I_a^*$ ,  $I_b^*$ ,  $I_c^*$  – en conséquence les conjugués complexes des courants des phases.



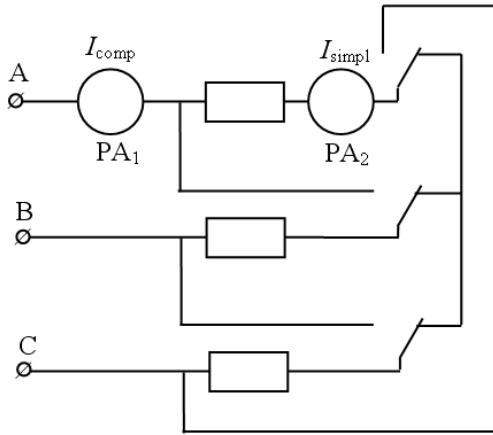
## 6.7 Comparaison des conditions de fonctionnement du récepteur lors de la connexion de ses phases en triangle et en étoile

Le schéma de commutation de trois phases du récepteur ne dépend pas du schéma de commutation de trois phases du générateur. La connexion des phases du récepteur en triangle on change souvent à la connexion en étoile pour le changement du courant et de la puissance, par exemple pour la réduction des courants de démarrage des moteurs asynchrones, le changement de la température des fourneaux électriques triphasés, etc.

Examinons comment changent les valeurs efficaces des courants d'un récepteur symétrique, dont l'impédance de phase  $Z_{ph}$ , lors de la commutation des phases de l'étoile à triangle, par exemple, à l'aide d'un interrupteur à trois pôles (voir la figure 6.11).

Lors de la connexion des phases d'un récepteur en étoile entre les valeurs efficaces simples et composé des courants (6.6) et des tensions (6.7) sont justes les rapports

$$I_{simply} = U_{simply} / Z_{phase} = I_{compY} , \quad U_{simply} = U_{comp} / \sqrt{3} ,$$



**Figure 6.11** – Schéma de commutation d'un récepteur triphasé de l'étoile à triangle

d'où vient que

$$I_{compY} = \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}Z_{ph}} . \quad (6.19)$$

Lors de la connexion des phases d'un récepteur en triangle entre les valeurs efficaces des courants (6.12) et des tensions (6.11) simples et composés sont justes les rapports

$$I_{simpl\Delta} = \frac{U_{simpl\Delta}}{Z_s} = \frac{I_{comp\Delta}}{\sqrt{3}} , \quad U_{s\Delta} = U_{comp} ,$$

d'où vient que

$$I_{comp\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{comp}}{Z_{ph}} . \quad (6.20)$$

En comparant les expressions des valeurs efficaces des courants composés lors de la connexion des phases d'un récepteur en « étoile » (6.19) et en « triangle » (6.20), nous recevrons pour la même valeur de la tension composée  $U_{comp}$  et les impédances identiques des phases  $Z_{phase}$

$$I_{comp\Delta} = 3I_{compY} ,$$

et pour les valeurs efficaces des courants simples

$$I_{simpl\Delta} = \sqrt{3}I_{simply} .$$

La puissance active du récepteur symétrique triphasé dans l'un des schémas de connexion (6.15) est égale à

$$P = \sqrt{3}U_{comp}I_{comp} \cos \varphi .$$

À cause de la diminution de la valeur efficace de courant composé lors de la commutation des phases d'un récepteur de « triangle » à « l'étoile » la puissance diminue en 3 fois, i.e.

$$P_{\Delta} = 3P_Y . \quad (6.21)$$

### Conclusions principales

1. Dans les systèmes électriques triphasés on applique deux schémas de connexion des consommateurs – en « étoile » et en « triangle ». Les sources d'énergie électrique, en général, se connecte par le schéma en « étoile ».

2. Dans un système triphasé symétrique :

- les tensions combinées (simples) sont décalés l'une par rapport à l'autre selon la phase sur l'angle  $2\pi/3$  ;

- la somme vectorielle des tensions simples (combinées) est égale à zéro.

3. Dans un système triphasé symétrique lors de la connexion des phases du consommateur « en étoile » :

- les courants combinés sont égaux aux courants simples ;

- les tensions combinées sont à  $\sqrt{3}$  plus grand que les tensions simples.

4. Dans un système triphasé symétrique lors de la connexion des phases du consommateur en « triangle » :

- les tensions simples sont égaux aux tensions combinées ;

- les courants combinés sont à  $\sqrt{3}$  plus grand que les courants simples.

5. Dans les circuits électriques triphasés à quatre fils :

- les phases de la source et les phases du consommateur se lient toujours en « étoile » ;

- le fil nul assure la symétrie des tensions simple de la source et du consommateur ;

6. Lors de la commutation des phases d'un récepteur de « triangle » à « étoile » sa puissance active diminue à 3 fois.

### Questions pour la maîtrise de soi

1. Dans quels sens en génie électrique utilise-t-on le terme de phase ?
2. Qu'entend-on par un système électrique triphasé ?
3. Dans quel cas un système triphasé est considéré comme symétrique ?
4. Que c'est qu'on appelle l'ordre des phases directe (inverse) ?
5. Qu'entend-on par un neutre du réseau triphasé ?
6. Quels schémas de connexion des phases on utilise dans les réseaux triphasés ?
7. Notez sous la forme complexe les tensions simples du consommateur triphasé symétrique connecté en « étoile ».
8. Dessinez le diagramme vectoriel des tentions simples et combinées du consommateur connecté en « étoile ».
9. Dessinez le diagramme vectoriel des tentions et des courants du consommateur connecté en « triangle ».
10. Expliquez les particularité des circuits électrique triphasé à quatre fils.
11. Expliquez les notions de puissance active, réactive et apparente d'une chaîne triphasée symétrique.

## Troisième parti : MESURES ÉLECTRIQUES

---

### Chapitre 7 : APPAREILS DE MESURE ÉLECTRIQUES

**Notions clés :** mesurage,  $m$  ; outils de mesures électriques,  $m\ pl$  ; étalon,  $m$  ; mesure étalonnée (ouvrière),  $f$  ; appareil de mesure électrique (AMÉ),  $m$  ; convertisseur de mesure,  $m$  ; dispositif de mesure électriques,  $m$  ; systèmes informatique de mesure électriques,  $m$  ; valeur de normalisation de l'AMÉ,  $m$  ; intervalle de la graduation,  $m$  ; sensibilité de l'AMÉ,  $f$  ; seuil de sensibilité,  $m$  ; erreur,  $f$  ; ampèremètre,  $m$  ; voltmètre,  $m$  .

#### 7.1 Termes de base

Les méthodes, les procédés et les moyens de la garantie de l'unité de la réception de l'exactitude demandée des mesures des valeurs physiques sont étudiés par la science de la métrologie. *L'unité des mesures* est considérée comme la comparabilité des résultats indépendamment du fait où, quand, qui et par quels moyens on mesurait la valeur physique donnée.

À présent pour la mesure des valeurs physiques du caractère divers et de la nature différente dans la science et sur la production on applique largement les méthodes électriques. Leurs avantages principaux sont : une haute sensibilité, la possibilité de l'automatisation du procès de la mesure, une petite consommation de l'énergie. L'application des convertisseurs des valeurs non électrique aux valeurs électriques permet aujourd'hui d'accomplir les mesures de pratiquement tous les paramètres des processus de fabrication de la branche de construction.

Le nombre des valeurs mécaniques, thermiques et d'autres grandeurs non électriques, qui font intérêt pour la science et la production, est beaucoup plus que le nombre de toutes les grandeurs électriques et magnétiques. La mesure des valeurs non électriques par les méthodes électriques a atteint maintenant un niveau élevé de développement et constitue une grande et vaste domaine de la technique moderne qui permet de faire de n'importe quel mesure nécessaire.

*Un mesurage* (une mesure) est considérée comme le procès consistant en une comparaison par un test d'une grandeur physique mesurée avec sa certaine signification, accepté pour l'unité. Ou, en d'autres termes, une mesure est le recherche des significations des valeurs des grandeurs physiques par la voie expérimentale à l'aide des équipements techniques.

Les résultats des mesures dans le cas général peuvent être inscrits comme il suit

$$X = n(x) , \quad (7.1)$$

où :

$X$  – signification mesurée ;

$n$  – caractéristique quantitative de la mesure ;

$x$  – unité de mesure.

On distingue *la signification véritable et la signification réelle de la valeur mesurée*. La signification véritable est considéré comme la signification libre de l'erreur de la mesure. La signification réelle est considérée comme la signification reçue à la suite de la mesure avec l'erreur admise. Si on peut négliger l'erreur de la mesure, la signification véritable coïncide la signification réelle  $X_{\text{vér}} \approx X_{\text{R}}$ .

Les *outils des mesurages électriques* ce sont les installations techniques utilisées pour les mesures électriques et ayant les caractéristiques métrologiques normalisée. Aux outils des mesures électriques se rapportent les mesures, les appareils de mesure électriques, les convertisseurs de mesure, les dispositifs de mesure électriques, les systèmes informatique de mesure électriques, etc.

Un **étalon** c'est un moyen de mesure destiné à la reproduction d'une valeur physique de la signification donnée. En métrologie, « un étalon est la matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude » [60]. Aux étalons principales des valeurs électriques se rapportent les étalons de l'ampère (unité de base du SI), de l'ohm, du volt (unités dérivées du SI), du watt et al. En fonction du degré de l'exactitude et du domaine d'utilisation les étalons subdivisent en l'étalon national, primaire, secondaire, de référence et l'étalon de travail.

« Un **étalon international** c'est un étalon reconnu au niveau international et à partir duquel toutes les mesures effectuées par le monde découlent. C'est-à-dire que tous les instruments de mesure et étalons utilisés sont raccordés à cet étalon.

Un **étalon national** est un étalon reconnu par une autorité nationale pour servir, dans un état ou une économie, comme base à l'attribution de valeurs à d'autres étalons de grandeurs de la même nature.

Un **étalon primaire** est un étalon établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet par convention.

Un **étalon secondaire** est un étalon établi par l'intermédiaire d'un étalonnage par rapport à un étalon primaire d'une grandeur de même nature.

Un **étalon de référence** est un étalon conçu pour l'étalonnage d'autres étalons de grandeurs de même nature dans une organisation donnée ou en un lieu donné.

Un **étalon de travail** est un étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des instruments de mesure ou des systèmes de mesure. » [60].

Par *les appareils de mesure électrique (AMÉ)* on appelle les moyens des mesures électriques destiné à la production des signaux de l'information de mesure sous la forme accessible pour la perception directe par l'observateur. À ceux-ci se rapportent, par exemple, l'ampèremètre, le voltmètre, le wattmètre, le compteur électrique.

Par *les convertisseurs de mesure* on appelle les moyens des mesures électriques destiné à la production du signal de l'information électrique sous la forme, confortable pour le transport, la transformation ultérieure, les traitements et les conservations, mais ne cédant pas à la perception directe par l'observateur. On les subdivise sur les convertisseurs des valeurs électriques à valeurs électrique (les shunts, les diviseurs de tension, les transformateurs de mesure, etc.), sur les convertisseurs des valeurs non électriques à valeurs électrique, sur les convertisseurs primaires (les thermorésistances, les thermocouples, les tensorésistances, les convertisseurs capacitifs et inductifs, etc.).

Un ***dispositif de mesure électriques*** représente l'ensemble des moyens de mesure fonctionnellement unis (les mesures, les appareils de mesure, les convertisseurs de mesure) et les installations auxiliaires, destiné pour la production des signaux de l'information de mesure sous la forme confortable pour la perception directe par l'observateur et disposé à une place.

Un ***système informatique de mesurage*** – l'ensemble des moyens de mesurage et les installations auxiliaires jointes par les canaux de communication, destiné à la production des signaux de l'information de mesure d'une série de sources sous la forme confortable pour le traitement, la transmission et l'utilisation dans les systèmes de gestion automatiques.

## **7.2 Classification des appareils de mesure électrique**

On utilise les ***appareil de mesure électrique*** (AMÉ) pour mesurer des paramètres des chaînes électriques : l'intensité du courant, la tension, la puissance électrique, la résistance, la capacité, l'inductance.

Classification des appareils de mesure électrique s'effectue selon les critères suivants :

***Selon le principe de fonctionnement*** AMÉ se divisent en groupes suivants: magnéto-électriques, électromagnétiques, électrodynamiques, électrostatiques, ferrodynamiques. Les plus répandus sont les deux premiers groupes.

***Selon la nature du courant mesuré*** on distingue AMÉ de courant continu et alternatif.

***Selon la nature physique du paramètre mesuré*** on distingue : les ampèremètres – la mesure d'intensité du courant; les voltmètres – la mesure de la tension; les wattmètres – la mesure de la puissance électrique active ; les ohmmètres – la mesure de la résistance active, etc.

***Selon le moyen de la représentation des résultats*** de la mesure on distingue les appareils analogiques et les appareils numériques.

***Selon la destination*** on distingue les instruments industriels, les instruments inclus dans les systèmes d'information sophistiqués, des instruments de laboratoire.

Il y a aussi ***des appareils combinés***, permettant de mesurer plusieurs paramètres des circuits électriques.

En outre les appareils on subdivise sur les appareils de mesure indicateurs, enregistrant (les enregistreurs) et additionnant (les compteurs, les intégrateurs).

***Dans les appareils de mesure indicateurs*** le décompte de la signification de la valeur mesurée est produit par la position de la flèche relativement à l'échelle de l'appareil.

***Les appareils enregistreurs*** assurent comme l'inscription continue de la valeur mesurée sur le papier, et aussi le décompte direct des déclarations selon la flèche de mesure.

***Les appareils additionnant*** (intégrant) assurent la sommation des déclarations pour la période définie demandée du mesurage.

### 7.3 Caractéristiques techniques générales des appareils de mesure électrique

Aux mesures électriques il est nécessaire de prendre en considération les limites minimales et maximale des mesures, le prix de la division de l'appareil, sa sensibilité, l'erreur de mesure, la résistance d'entrée, la puissance consommée.

La limite supérieure de l'appareil de mesure s'appelle **la signification réglant**  $X_R$ .

La flèche des appareils de mesure multicalibres montre la valeur mesurée dans les divisions de l'échelles. Pour passer à la valeur de la mesure il faut définir **l'intervalle de la graduation** (le nombre d'unités du paramètre mesuré dans une division d'appareils de mesure)

$$C = \frac{X_R}{N}, \quad (7.2)$$

où  $N$  – nombre des divisions de l'échelle.

La signification de la valeur physique on définit comme il suit

$$X = C \cdot n, \quad (7.3)$$

où  $n$  – le nombre des divisions d'écart de la flèche de l'appareil.

Sous la **sensibilité de l'appareil de mesure** on comprend la relation du changement du signal sur la sortie de l'appareil vers le changement de la valeur mesurée. Que peu de variation de la valeur mesurée marquera le dispositif, il est plus de possibilités pour la mesure de haute précision.

On distingue la **sensibilité absolue**  $S_{ab}$  **et relative**  $S_{rel}$  :

$$S_{ab} = \frac{\Delta I}{\Delta X} \quad ; \quad S_{rel} = \frac{\Delta I}{\Delta X / X}, \quad (7.4)$$

où :

$\Delta I$  – changement du signal sur la sortie de l'appareil ;

$\Delta X$  – changement de la valeur mesurée ;

$X$  – signification de la valeur mesurée.

Le changement de la valeur mesurée provoquant le plus petit déplacement de l'index de l'appareil, que l'on peut remarquer au moyen normal du décompte, s'appelle le **seuil de sensibilité**.

La sensibilité  $S$  est liée à l'intervalle de la graduation de l'appareil  $C$  par le rapport suivant :

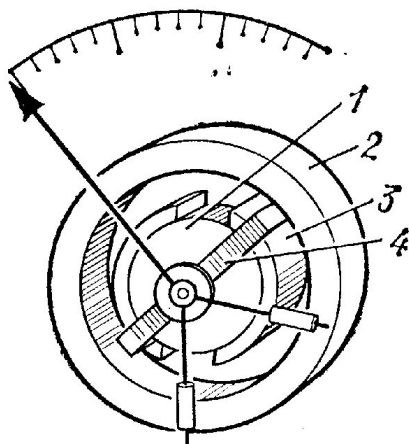
$$S = \frac{1}{C}. \quad (7.5)$$

Les limites des erreurs admises (de base et supplémentaire) peuvent être exprimées sous les formes de l'erreur absolue, relative et réduite. Plus en détail les erreurs de moyens et de méthodes de mesures sont examinées dans le chapitre 8.1.

## 7.4 Appareils magnéto-électriques

On utilise les appareils du système magnéto-électrique dans les circuits du courant continu pour la mesure du courant et de la tension. Ils ont un certain nombre d'avantages: une haute sensibilité et l'exactitude, l'uniformité de l'échelle et une petite consommation de la puissance.

Le principe de l'action des appareils magnéto-électrique est basé sur l'interaction du champ magnétique, créé par le courant mesuré dans la bobine mobile, avec le champ magnétique de l'aimant permanent. Dans le résultat de cette interaction le cadre se tourne sur l'angle proportionnel au courant mesuré. La figure 7.1 montre l'installation d'un appareil magnéto-électrique, dont l'aimant est situé à l'intérieur du cadre. Dans l'appareil il y a un aimant permanent 1 et le noyau magnétique circulaire 2, fabriqué de l'acier magnétique doux.



**Figure 7.1** – Structure d'appareil magnéto-électrique

En vertu du flux de force magnétique non uniforme de l'aimant permanent sur les divers terrains de l'entrefer il y a un sur les divers terrains de l'entrefer il y a un champ magnétique non uniforme. Pour l'élimination de ce manque on installe les appliques en acier magnétique doux 3, permettant de créer un champ magnétique uniforme radial.

Dans l'entrefer entre l'aimant 1 avec les appliques 3 et bati magnétique 2 il y a une bobine mobile 4, réalisé sous la forme d'un cadre du fil de cuivre isolé. Le cadre est fixé sur les

crapaudines et elle tourne librement sur son axe.

Le ressort de torsion, lié à l'axe de l'appareil, crée lors de la rotation du cadre un moment résistant.

À l'insertion de l'appareil à la chaîne électrique dans le cadre de l'appareil apparaît le courant électrique. L'interaction du courant dans le cadre avec le champ magnétique de l'aimant permanent amène à la création d'un couple du cadre, proportionnel au courant

$$M_{\text{tour}} = k_1 I, \quad (7.6)$$

où :

$M_{\text{tour}}$  – couple du cadre ;

$I$  – courant dans le cadre ;

$k_1$  – coefficient de la proportionnalité qui dépend des dimensions du cadre, du nombre des spires, de la valeur de l'induction magnétique dans l'entrefer entre les bouts de l'aimant permanent et le cardiaque, ainsi que du système des unités de mesure.

Sous l'effet du couple le cadre se tourne, le ressort de torsion commence à s'enrouler et créer le moment résistant

$$M_{\text{rés}} = k_2 \alpha, \quad (7.7)$$

où :

$k_2$  – coefficient dépendant des propriétés élastiques du ressort ;

$\alpha$  – angle du torsion du ressort (angle de la rotation du cadre).

En cas d'égalité du couple et du moment résistant agissant sur le cadre, arrive son équilibre  $M_{\text{tour}} = M_{\text{rés}}$ , i.e.  $k_1 \cdot I = k_2 \cdot \alpha$ , d'où l'angle de rotation du cadre avec flèche est égale à  $\alpha = (k_1/k_2) I = k \cdot I$ .

À partir de la dernière équation il vient que *l'angle de rotation de la flèche de l'appareil magnéto-électrique est proportionnel directement à la valeur du courant passant à travers le cadre* et que *l'échelle de l'appareil est uniforme*.

Les appareils du système donné sont strictement polaire et pour l'insertion juste à la chaîne électrique les bornes de l'appareil ont le marquage « + » et « - ».

**7.4.1 Mesure de courant continu.** Les appareils pour des mesures du courant sont appelés *ampèremètres*. Dans une chaîne électrique on connecte un ampèremètre successivement, et en outre la résistance de l'appareil doit être à beaucoup de fois moins de résistance de la chaîne électrique.

Pour la mesure des courants supérieures à la limite de l'appareil, on utilise les shunts. Un *shunt* représente la résistance  $R_{\text{sh}}$ , connecté parallèlement à l'appareil de mesure. Dans certains cas pour le confort des mesures des petits et des grands courants l'appareil a plusieurs shunts. Qu'il y a moins de résistance du shunt en comparaison de la résistance interne de l'ampèremètre, le plus petit courant passe dans l'appareil.

Puisqu'en circuits électriques, dont les éléments sont connectés en parallèle, ont la-meme tension, alors pour le shunt et l'ampèremètre (fig. 7.2) on peut inscrire l'égalité suivante  $I_0 R_0 = I_{\text{sh}} R_{\text{sh}}$ , d'où  $R_{\text{sh}} = I_0 R_0 / I_{\text{sh}}$ .

En vertu de la loi de Kirchhoff le courant complet en chaîne est égal  $I = I_0 + I_{\text{sh}}$ , alors, en remplaçant la signification du courant  $I$ , nous définirons la résistance du shunt

$$R_{\text{sh}} = I_0 R_0 / (I - I_0),$$

où :

$I_0$  – courant de la déviation complète de la flèche de l'ampèremètre ;

$R_0$  – résistance interne de l'ampèremètre ;

$I$  – courant mesuré dans le circuit.

**7.4.2 Mesure des tensions continu.** Les appareils pour des mesures de la tension sont appelés *voltmètres*. Un voltmètre pour la mesure des tensions continus est composé d'un appareil à aiguille du système magnéto-électrique avec lequel est connecté en série une résistance additionnelle (fig. 7.3).

On choisi la *résistance additionnelle* de sorte qu'à la signification limitée de la tension mesuré, la flèche de l'appareil avait la limite d'écart. La valeur de la résistance additionnelle est définie par la formule

$$R_{\text{add}} = (U_{\text{lim}} / I_0) - R_0, \quad (7.8)$$

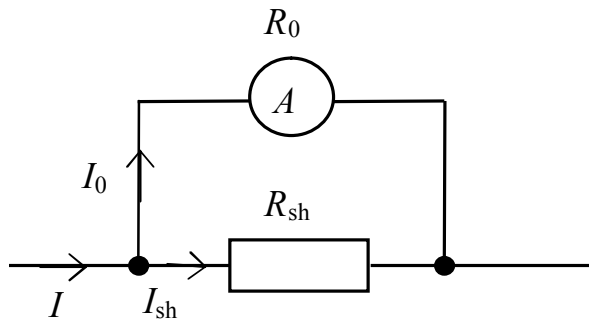
où :

$U_{\text{lim}}$  – signification limitée de la tension mesurée ;

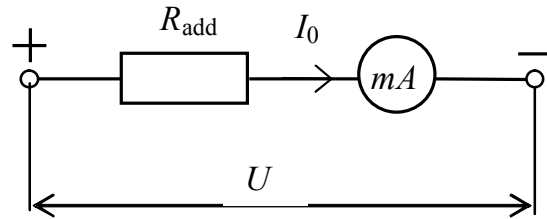
$I_0$  – courant de la déviation complet de l'appareil ;

$R_0$  – résistance interne de l'appareil.





**Figure 7.2** – Schéma de branchement d'un ampèremètre avec shunt



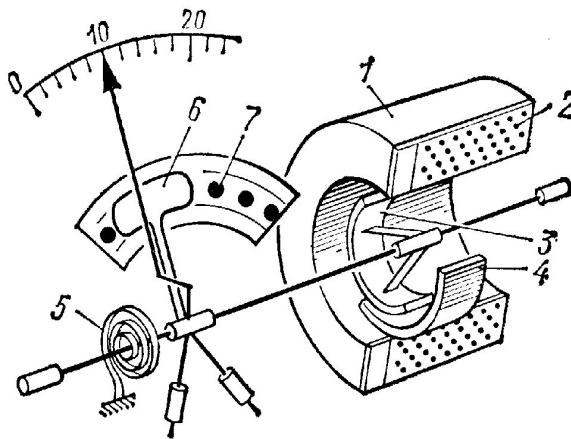
**Figure 7.3** – Schéma électrique du voltmètre

Lors de la mesure des tensions on branche un voltmètre en dérivation dans le circuit électrique mesuré.

## 7.5 Appareils électromagnétiques

Les appareils du système électromagnétique sont largement utilisés dans les circuits à courant continu et alternatif. Les avantages des appareils de système électromagnétique sont la simplicité de la conception, de la fiabilité et de la résistance aux surcharges.

Le principe de l'action de l'appareil du système électromagnétique est fondé sur l'interaction de deux noyaux ferromagnétiques aimantés sous l'effet du champ magnétique de la bobine, dans laquelle coule le courant mesuré.



**Figure 7.4** – Élément de mesure du système électromagnétique

Un élément de mesure du système électromagnétique avec une bobine ronde est présenté sur la figure 7.4. À l'intérieur de la bobine 2 avec l'écran 1 on établit deux noyaux ferromagnétiques aréolaires : mobile 3, affermi sur l'axe, et immobile 4.

Lorsque le courant mesuré déroule sur la bobine 2 les noyaux 3, 4 sont aimantés homonymement et c'est pour cela qu'ils s'écartent l'un de l'autre. En conséquence de cela il y a un couple et l'aiguille

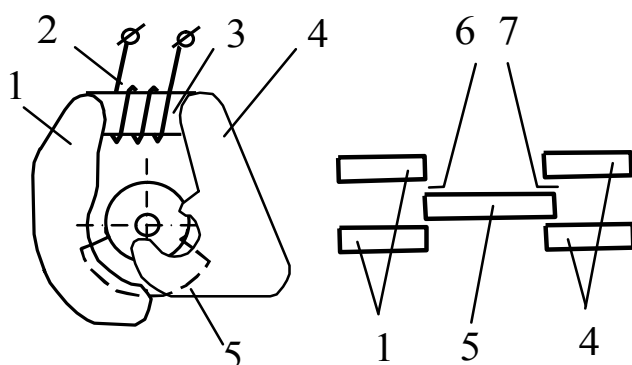
indicateur de l'appareil s'écarte sur un angle défini.

Le moment résistant est créé par le ressort 5. L'amortisseur magnéto-inductif de l'appareil a le secteur mobile d'aluminium 6 et les aimants permanents 7.

Simultanément du déplacement de la flèche de mesure de l'appareil au secteur 6 sont créés les courants de Foucault. À la suite de l'interaction de ces courants avec le champ magnétique des aimants permanents 7 il y a une force freinant le mouvement du secteur 6.

Le couple du mécanisme de mesure de l'appareil dans un circuit de courant alternatif est proportionnelle au carré de la valeur efficace du courant  $M_{\text{tour}} \approx C \cdot I^2$ . À cause de cela *l'échelle de l'appareil est quadratique*. Ce qui est son inconvénient. Par la sélection de la forme des noyaux ferromagnétiques est possible d'obtenir une échelle qui est inégale seulement dans sa partie initiale.

On réussit d'améliorer la sensibilité, l'exactitude et la durée de service des appareils de mesure électrique à la suite de l'élaboration d'un système magnétique principalement nouveau, de passage des supports de carotés des pièces mobiles sur la fixation à l'aide des hubans et l'introduction d'une structure nouvelle d'amortisseur liquide. Par exemple, le mécanisme unifié de mesure est 50 fois plus sensible que d'autres types des appareils aux mêmes gabarits.



**Figure 7.5** – Structure du mécanisme de mesure unifié

La structure du mécanisme de mesure unifié est montrée sur la figure 7.5. La bobine 2 est établie sur une carcasse immobile magnétique 3, dont les fins ont deux paires de plaques polaires 1 et 4. Les plaques forment par deux les jeux 6 et 7, dans lesquels se trouve un noyau mobile 5.

On applique les appareils électromagnétiques pour les mesures dans les circuits des

courants continus et alternatifs comme les ampèremètres et les voltmètres.

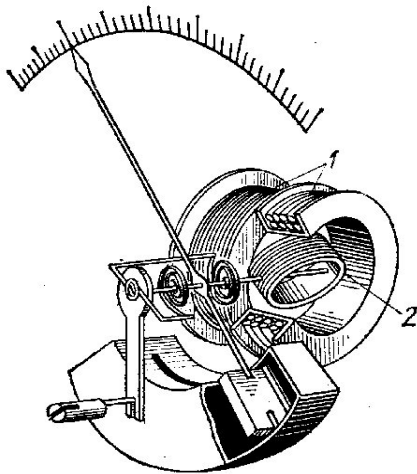
On fabrique les ampèremètres à un calibre et les ampèremètres multicalibres par le partitionnement de la bobine. Les voltmètres accomplissent d'habitude sur quelques limites de la mesure par l'utilisation d'une série des résistances supplémentaires.

Les appareils électromagnétiques sont uns des plus répandu des appareils de tableau pour les mesures dans des circuits à courant alternatif : ils sont simples par la structure et sont sûrs, transfèrent relativement bien les surcharges. Les inconvénients de ces appareils sont l'exactitude relativement faible, une grande consommation personnelle de l'énergie (les ampèremètres jusqu'à 5 W, les voltmètres jusqu'à 1,5–12 W), la gamme de fréquences limitée, l'influence des champs magnétiques extérieurs sur les lectures de la graduation.

Les ampèremètres de tableau sont produits des classes 1,0; 1,5; 2,5 aux courants jusqu'à 300 A de l'insertion directe (avec les transformateurs du courant insérés) et jusqu'à 15 kA avec les transformateurs du courant extérieurs. Les voltmètres de tableau des mêmes classes sont produits sur les tensions jusqu'à 600 V aux insertions directes et jusqu'à 450 kV avec les transformateurs de tension.

## 7.6 Appareils électrodynamiques et ferrodynamiques

**7.6.1 Appareil de mesure électrodynamiques.** Le principe de fonctionnement d'un appareil du système électrodynamique est basé sur l'interaction des champs magnétiques des bobines immobile et mobile lors du passage par eux du courant mesuré.



**Figure 7.6** – Structure de l'appareil du système électrodynamique

Le mécanisme de mesure électrodynamique (fig. 7.6) comprend deux bobines : immobile 1 et mobile 2. La bobine 2 est affermie sur les extensions (ou sur les axes) et peut se tourner autour de l'axe à l'intérieur de deux sections de la bobine immobile. À la présence dans ses bobines des courants continus  $I_1$  et  $I_2$  apparaissent les forces électromagnétiques de l'interaction, aspirant à tourner la bobine 2 alignée sur la bobine 1. Ce qui produit le couple

$$M_{\text{tourn}} = k I_1 I_2. \quad (7.9)$$

Dans le cas d'un courant sinusoïdal le couple du mécanisme de mesure électrodynamique est proportionnel à l'oeuvre des significations efficace des courants dans les bobines  $I_1$  et  $I_2$  et le cosinus de l'angle du déphasage entre eux  $M_{\text{tourn}} = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \delta$ .

Les appareils électrodynamiques sont utilisés dans les circuits des courants continu et alternatif comme les ampèremètres, les voltmètres et les wattmètres.

**7.6.2 Mesure de la puissance.** On utilise les wattmètres électrodynamiques pour la mesure de la puissance dans les chaînes des courants continus et alternatifs. À l'utilisation du wattmètre dans les chaînes du courant continu (fig. 7.7) la bobine immobile est inclus dans le circuit du courant  $I$ , et la bobine mobile avec une résistance additionnelle  $R_{\text{add}}$ , connectée en série, est inclus parallèlement de charge avec la résistance  $R_{\text{ch}}$ . Dans le circuit de dérivation du wattmètre se forme le courant

$$I_V = U/R_V,$$

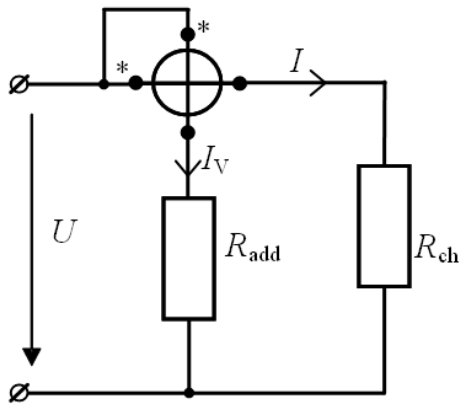
où :

$R_V$  –résistance de cette chaîne  $R_V = R_{\text{b.ten}} + R_{\text{supl}}$  ;

$R_{\text{b.ten}}$  – résistance de la bobine de tension de l'appareil.

Alor, ayant mis à (7.9)  $I_1 = I$ ,  $I_2 = I_V$ , on obtient

$$M_{\text{tourn}} = k \cdot I \cdot I_V = k \cdot U / R_V, \quad (7.10)$$



**Figure 7.7** – Schéma de branchement du wattmètre électrodynamique

ou

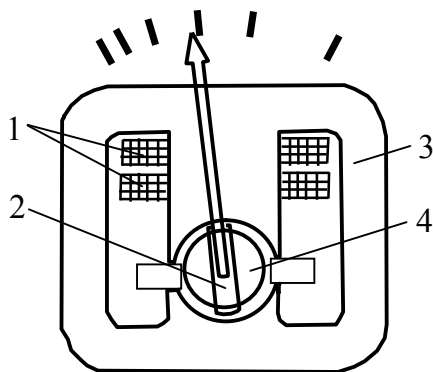
$$M_{\text{tourn}} = C \cdot U \cdot I = C P, \quad (7.11)$$

où  $C$  – coefficient de la proportionnalité.

Ainsi, le couple est proportionnel à la puissance consommée par la résistance de la charge  $R_{\text{ch}}$ .

Le schéma de branchement du wattmètre à la chaîne du courant alternatif est analogue au schéma montré sur la figure 7.7.

**7.6.3 Appareil de mesure ferrodynamiques.** Le mécanisme de mesure ferrodynamique (voire la figure 7.8) se distingue d'appareil électrodynamique par un champ magnétique plus fort reçu grâce à la présence du système magnétique, composé d'une carcasse magnétique 3 et d'un cylindre immobile 4. La bobine immobile 1 crée le champ magnétique dans le jeu, où on peut se tourner la bobine mobile 2. Grâce à la présence de la carcasse magnétique dans ce mécanisme il y a un couple plus fort qu'au mécanisme électrodynamique.



**Figure 7.8** – Mécanisme de mesure ferrodynamique

On utilise les appareils ferrodynamiques (ampèremètres, voltmètres, wattmètres) principalement dans les chaînes du courant alternatif en qualité des appareils de tableau et des appareils portables. Ils se distinguent par une plus petite réceptivité aux champs magnétiques extérieurs, une grande sensibilité et une plus petite consommation personnelle de l'énergie. Les inconvénients des appareils ferrodynamiques sont l'exactitude relativement basse et la gamme limitée de fréquence.

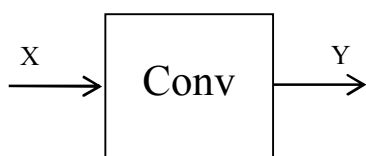
## 7.7 Convertisseurs de mesure

Les convertisseurs de mesure représentent un grand groupe d'instruments de mesure destinés à la transformation d'une grandeur physique mesurée  $X$  à une valeur  $Y$ , confortable pour la fixation (généralement, la tension ou le courant) (fig. 7.9).

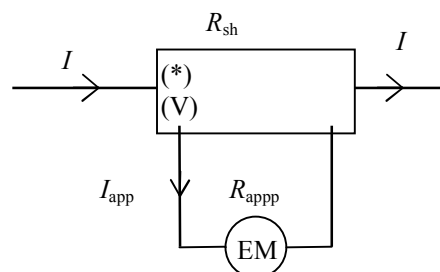
En génie électrique, on utilise les convertisseurs suivants: les shunts et les résistance additionnelle; des transformateurs de mesure de courant et de tension; convertisseurs de type de courant.

**Les shunts** sont les résistances montées successivement dans la chaîne du courant mesuré et en dérivation sur un mécanisme de mesure. Ils sont fabriqués de la manganine.

Les bornes du shunt, à qui on amène le courant, s'appellent les bornes de courant. Sur les schémas ils sont désignés par (\*). Les bornes, à qui on connecte l'élément de mesure (EM), s'appellent les bornes de potentiels. Sur la figure 7.10 ils sont désignés par (V).



**Figure 7.9** – Convertisseur de mesure



**Figure 7.10** – Schéma de branchement du shunte

Les shunts sont caractérisés par les valeurs nominales du courant d'entrée et de la tension de sortie. L'attitude de la tension nominale au courant nominal est déterminé par la résistance nominale des shunts.

Le courant nominal à la chaîne est défini comme :

$$I_{\text{app}} = I \frac{R_{\text{sh}}}{R_{\text{app}} + R_{\text{sh}}}, \quad I = I_{\text{app}} \left( \frac{R_{\text{app}}}{R_{\text{sh}}} + 1 \right) = I_{\text{app}} \cdot p, \quad (7.12)$$

avec  $p = \frac{R_{\text{app}}}{R_{\text{sh}}} + 1$  – le coefficient, qui s'appelle **multiplieur de shuntage**. Il indique de combien de fois courant mesuré à la chaîne est plus du courant de l'appareil ou de combien de fois s'élargit la limite de la mesure de courant

$$p = \frac{I}{I_{\text{app}}}. \quad (7.13)$$

De (7.12) on peut obtenir le rapport à la définition de la résistance du shunt

$$R_{\text{sh}} = \frac{R_{\text{app}}}{p - 1}. \quad (7.14)$$

Il y a des shunts qui sont montés à l'intérieur et à l'extérieur de l'appareille de mesure, des shunts d'un calibre et à calibres multiples (voir fig. 7.11). Par la précision de la mesure ils sont divisés en classes : 0,02; 0,05; 0,16; 0,2; 0,5; 1.

En général on utilise les shunts dans les chaînes du courant continu. En courant alternatif la distribution du courant dans les branches parallèles dépend de l'auto-inductance et de la fréquence, ce qu'apporte l'erreur supplémentaire aux mesures.

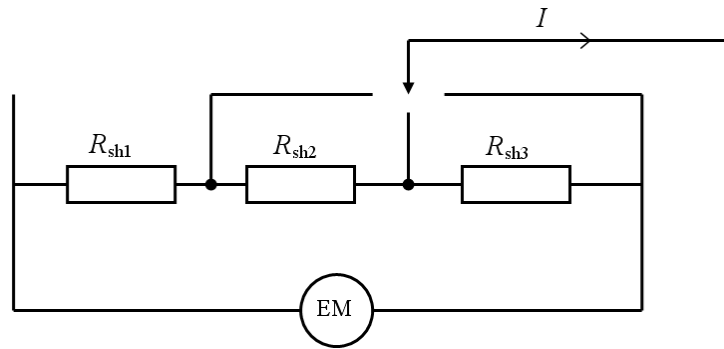


Figure 7.11 – Schéma du shunt multiple

On utilise les shunts, en général, dans les chaînes du courant continu. En courant alternatif la distribution du courant dans les branches parallèles dépend de l'auto-inductance et la fréquence, ce qu'apporte l'erreur supplémentaire aux mesures.

**Les résistances additionnelles** sont employés pour l'élargissement des limites de la mesure de tension. On les branche en série au élément de mesure (voire la figure 7.12), ce qui exclut l'influence de la température sur la résistance de l'appareil.

Conformément à la figure 7.12 nous pouvons inscrire

$$U = U_{app} + U_{add} = I_{app}(R_{app} + R_{add}) . \quad (7.15)$$

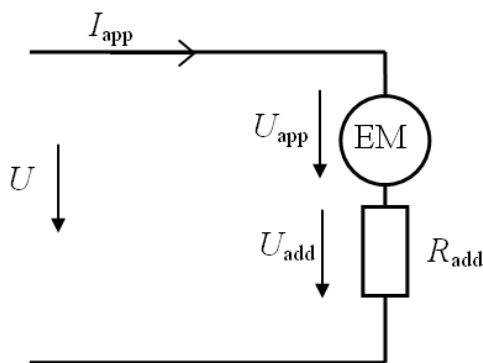


Figure 7.12 – Schéma de branchement de la résistance additionnelle

De l'équation (7.15) il suit que

$$R_{add} = \frac{U - I_{app} \cdot R_{app}}{I_{app}} = R_{app} (p - 1), \quad (7.16)$$

où  $p = U/U_{app}$  – le facteur de division de tension.

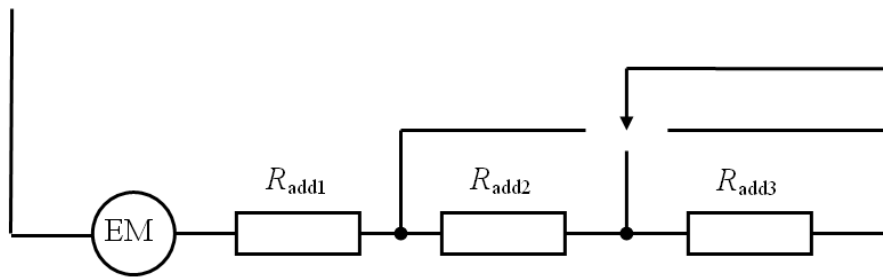
De (7.16) il s'ensuit que la résistances additionnelles doit être à  $(p - 1)$  fois plus de résistance de l'appareil.

Pour avoir les voltmètres multicalibres on utilise souvent les résistances additionnelles, composée de plusieurs résistors (fig. 7.13).

Les diviseurs de tension fonctionnent selon le même principe, i.e. de chaque résistance on fait les bornes, de qui on peut retirer la tension souhaitée.

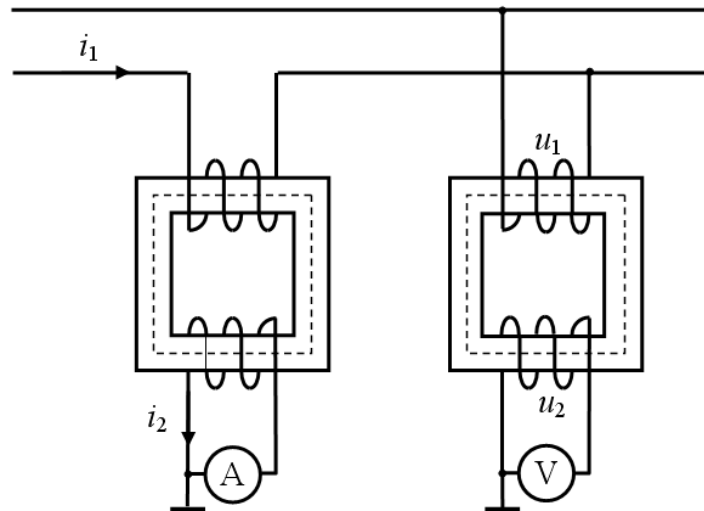
Les résistances additionnelles ont les classes de précision : 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 et sont fabriqués aux courants nominaux : 0,5; 1; 3; 5; 7; 15 A et à 30 mA.

**On utilise les transformateurs de mesure du courant et de la tension** comme les convertisseurs des grands courants et des hauts tensions alternatives aux courants et tensions d'assez petits (voir le chapitre 9.6), admissible pour être mesurer par les appareils avec de petites significations standard nominales (par exemple, 5 A, 100 V).



**Figure 7.13** – Schéma de la résistance additionnelle multicalibre

Les transformateurs du courant et de la tension se distinguent par schéma de connection à la chaîne de mesure (fig. 7.14) et par les conditions de fonctionnement. Le bobinage primaire des transformateurs du courant est inclus dans le circuit de mesure successivement. Le bobinage primaire du transformateur de la tension est branché en parallèle. Au bobinage secondaire on connecte les appareils de mesure : l'ampèremètre et le voltmètre en conséquence.



**Figure 7.14** – Schémas de branchement des transformateurs du courant et de la tension

Selon les lectures des appareils, insérés dans les bobinages secondaires, on peut définir les significations des valeurs mesurées. Pour cela il est nécessaire de multiplier leurs lectures sur les coefficients nominaux de transformation (qui sont indiqués dans les passeports des transformateurs). Pour un transformateur du courant

$$k_{I_n} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}, \quad (7.17)$$

et pour un transformateur de la tension

$$k_{U_n} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}. \quad (7.18)$$

Les coefficients valables de transformation  $k_U$  et  $k_I$  dépendent des significations des résistances de la chaîne secondaire, de la tension et du courant

dans le circuit primaire. À cause de cela apparaissent les erreurs sur le coefficient de la transformation :

$$\delta_U = \frac{k_{U_n} - k_U}{k_U} \cdot 100\%, \quad \delta_I = \frac{k_{I_n} - k_I}{k_I} \cdot 100\% . \quad (7.19)$$

Le courant  $I_1$  et la tension  $U_1$  mesurés sont définis par les formules :

$$I_1 = k_{I_n} I_2, \quad U_1 = k_{U_n} U_2 . \quad (7.20)$$

**Les autotransformateurs** sont utilisés pour la transformation dans les chaînes du courant alternatif d'une tension alternative à l'autre (voir aussi le chapitre 9.5). Ils ont un bobinage enroulé sur un noyau, dont les spires  $w_1$  normalement sont comptées sur la tension de 220 V. La partie des spires dans ce bobinage se séparent à l'aide d'un curseur et ses spires forment des spires de l'enroulement secondaire  $w_2$ . Au mouvement du curseur la tension change de « 0 » à la tension du réseau (voir la figure 7.15).

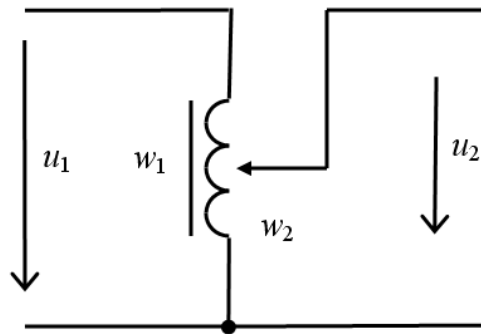


Figure 7.15 – Schéma de l'autotransformateur

**Les convertisseurs de redressement (CR)** sont utilisés dans les appareils de mesures électrique pour convertir le courant alternatif en courant continu (voir la figure 7.16) et on les fabrique à base de semi-conducteurs.



Figure 7.16 – Schéma fonctionnel du convertisseurs de redressement

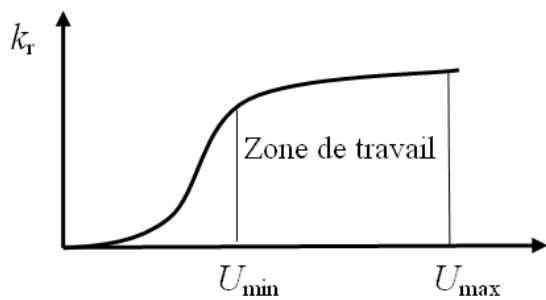
La principale caractéristique d'un CR est le coefficient de redressement  $k_r$ , qui caractérise la relation du courant direct  $I_{dir}$  à travers la diode à son courant inverse  $I_{inv}$

$$k_r = \frac{I_{dir}}{I_{inv}} = \frac{R_{inv}}{R_{dir}} . \quad (7.21)$$

Le coefficient de redressement dépend de la valeur de la tension, de la température ambiante, de la fréquence d'un courant alternatif redressé.

La figure 7.17 montre la dépendance du coefficient de redressement de la tension appliquée. Lorsque la tension  $U < U_{min}$  redressement ne se passe. Lorsque la tension  $U > U_{max}$  une rupture de la diode se produit.





**Figure 7.17** – Dépendance  $k_r = f(U)$

Pour une diode au germanium  $k_r = (4-5) \cdot 10^3$ , et pour une diode de silicium  $k_r = 10^5 - 10^6$ .

On mesure le courant redressé par les appareils magneto-électrique et on utilise un redresseur à simple ou à double alternance (voir le chapitre 13.2).

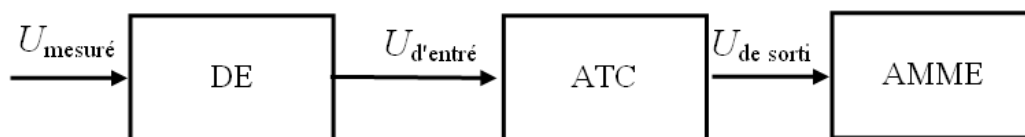
Les appareils avec les CR mesurent la valeur moyenne du courant et de la tension. Pour recalculer leurs valeurs efficaces il faut tenir compte du coefficient de la forme des courbes de courant et de tension. Pour réduire l'ondulation dans les circuits à courant on mets des filtres capacitifs, inductifs, combinés.

## 7.8 Appareils de mesure analogiques

L'appareil de mesure analogiques constitue un outil de mesure, dans lequel la conversion de signaux de mesure de l'information se fait à l'aide des appareils électroniques analogiques. La mesure de ces appareils est une fonction continue les modifications de la valeur mesurée. Un exemple de ce groupe des appareils sont les voltmètres électroniques.

Les voltmètres électroniques convertissent la tension mesurée à l'aide des appareils analogiques à courant continu qui est appliqué sur un mécanisme de mesure dont échelle est graduée en unités de tension.

On distingue les voltmètres de tension continue et tension alternatif. Le schéma-bloc d'un voltmètre électronique de tension continue est représenté sur la figure 7.18. Le voltmètre contient : DE – un dispositif d'entrée sous la forme d'un diviseur de tension de haute résistance, ATC – un amplificateur de tension continue, AMME – un appareil de mesure magnéto-électrique.

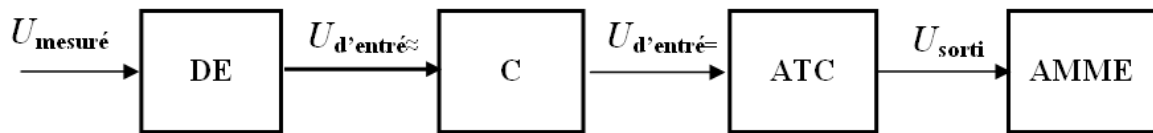


**Figure 7.18** – Schéma-bloc d'un voltmètre électronique de tension continue

Le dispositif d'entrée offre une haute impédance d'entrée et les valeurs de tension mesuré requis pour la poursuite de la conversion. L'amplificateur permet d'augmenter la sensibilité du voltmètre et d'amplifier le puissance du signal de mesure afin de rendre l'action au mécanisme de mesure magnéto-électrique.

La particularité des voltmètres électroniques de la tension alternative est la présence d'un convertisseur C (voir la figure 7.19) de tension alternative en tension continue. En fonction de la valeur de la tension à mesurer (moyenne, efficaces, d'amplitude) on distingue respectivement les convertisseurs de tension alternative moyenne, efficaces et d'amplitude.

Les mérites des voltmètres électronique sont : une grande impédance d'entrée (plus de 1 MOhm), une faible consommation d'énergie, d'une haute sensibilité, une large gamme des tensions mesurée (de quelques dizaines de nanovolt avec du courant continu jusqu'à des dizaines de kilovolts), une large gamme de fréquences (de DC à des centaines de Mhz).



**Figure 7.19** – Schéma-bloc d'un voltmètre électronique de tension alternative

## 7.9 Appareils de mesure numériques

Les réalisations dans le domaine des semi-conducteurs et de la microélectronique ont permis de mettre en place la production d'un large éventail d'instruments de mesure numérique aux différentes destinations. Ils sont utilisés pour la mesure des grandeurs électriques et mécaniques dans les activités de recherche, de production et de laboratoire.

Les appareils de mesure numériques ont un certain nombre d'avantages significatifs par rapport aux appareils analogiques : la haute précision, la possibilité de mémoriser, de transmettre et d'injecter les résultats de la mesure dans les systèmes de mesure automatisé.

Le principe de fonctionnement d'instruments de mesure numérique est basé sur la conversion continu de la grandeur mesurée dans la séquence d'impulsions (code numérique) avec un post-traitement de ce code. La conversion continu d'une grandeur de mesure est réalisée à l'aide des convertisseurs analogique-numérique, pour la construction lesquels on utilise trois méthodes : du temps-impulsion, de la fréquence et la méthode de servo-équilibre.

Dans les dispositifs de conversion temps-impulsion la valeur mesurée est convertie en l'intervalle de temps proportionnelle, qui est mesuré par le remplissage d'une séquence d'impulsions d'horloge de référence.

Lors de conversion la fréquence-impulsions la valeur mesurée est proportionnelle à la fréquence de la séquence d'impulsions, déterminée par le calcul des nombre d'impulsions à un intervalle de temps calibré.

La méthode de servo-équilibre consiste dans comparaison séquentielle de la valeur mesurée avec la somme des valeurs de référence discrètes modifiés par une loi particulière.

## **Conclusions principales**

1. La science de la métrologie étudie les méthodes, les procédés et les moyens de la garantie de l'unité de la réception de l'exactitude demandée des mesures des valeurs physiques.

2. Les avantages principaux des méthodes électriques pour la mesure des valeurs physiques de la caractéristique divers et de la nature différente sont : une haute sensibilité, la possibilité de l'automatisation du processus de la mesure, une petite consommation de l'énergie.

3. Mesurage – c'est un processus, consistant en une comparaison par un test d'une grandeur physique mesurée avec sa certaine signification, accepté pour l'unité.

4. Étalon c'est un moyen de mesure destiné à la reproduction d'une valeur physique de la signification donnée. Aux étalons principales des valeurs électriques se rapportent les étalons de l'ampère (unité de base du SI), de l'ohm, du volt (unités dérivées du SI), du watt et al.

5. On subdivise les appareils de mesure électrique en appareils de l'estimation directe et en appareils appliquant la méthode de comparaison. Au premier groupe se rapportent, en particulier, les appareils les plus répandus : les ampèremètres, les voltmètres, les wattmètres.

6. Selon le principe de la création du couple on subdivise les appareils de l'estimation directe en appareils magnéto-électrique, électromagnétique, électrodynamique, ferrodynamique et à induction.

7. Les appareils de mesure électrique sont classifiés selon la nature du courant mesuré (continu ou alternatif), selon le paramètre mesuré (courant, tension, puissance, etc.), selon le moyen de la présentation de la valeur mesurée.

8. Pour l'extension des limites de la mesure des ampèremètres et des voltmètres on utilise les résistances additionnelles. Dans l'ampèremètre une telle résistance (shunt) est connectée parallèlement à la résistance de l'appareil, dans le voltmètre – en série avec la résistance de l'appareil.

9. Les convertisseurs de mesure représentent un groupe d'instruments de mesure destinés à la transformation d'une grandeur physique mesurée X à la valeur Y, confortable pour la fixation (généralement, la tension ou le courant).

10. Les appareils de mesure numériques ont un certain nombre d'avantages significatifs par rapport aux appareils analogiques : la haute précision, la possibilité de mémoriser, de transférer et d'injecter les résultats de la mesure dans les systèmes de mesure automatisés.

## **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Qu'entend-on par le mesurage ?
2. En quoi consiste le processus de mesure ?

3. Quels sont les principes de classification des appareils de mesure électrique ?
4. Quelles sont les principales caractéristiques des appareils de mesure électrique ?
5. Qu'entend-on par la signification réglant ?
6. Qu'entend-on par la sensibilité de l'appareil de mesure ?
7. Qu'entend-on par le seuil de sensibilité ?
8. Comment on branchement dans un circuit électrique les ampèremètres et les voltmètres ?
9. Expliquer la conception et le principe de fonctionnement d'un appareil magneto-électrique ?
10. Expliquer la conception et le principe de fonctionnement d'un appareil électromagnétique ?
11. Expliquer la conception et le principe de fonctionnement d'un appareil électrodynamique ?
12. En quoi se distinguent les appareil ferrodynamiques ?
13. Expliquez le principe de fonctionnement du shunt.
14. Expliquez le principe de fonctionnement des résistances additionnelles.
15. Expliquez les schémas de dranchemen des transformateurs de mesure du courant et de la tension.
16. Quels sont les avantages des appareils de meusure analogiques ?
17. Quels sont les avantages des appareils numériques ?

## Chapitre 8 : MÉTHODES DE MESURES ÉLECTRIQUE

**Notions clés :** erreur systématique (aléatoires, grossière, absolue, relative, réduite conventionnelle),  $f$ ; sensibilité,  $f$ ; classe de précision,  $f$ ; mesure direct (indirect),  $f$ ; méthode de mesure directe (de comparaison, de réduction à zéro, différentielle, de substitution),  $f$ .

### 8.1 Erreurs de mesure

*Une erreur de mesure* c'est l'écart du résultat mesurage d'une grandeur de sa vraie valeur. En fonction de la nature de la déviation on distingue des erreurs systématiques, accidentelles et grossières.

*Les erreurs systématiques* sont modifiées naturel et aux mesures réitérées restent les mêmes. On les découvre seulement lors de la vérification de l'appareil.

*Les erreurs aléatoires.* On détecte ces erreurs lors de mesurages réitérées sous la forme d'une dispersion des résultats.

*Les erreurs grossières* donnent la différence rude du résultat attendu, et on ne les prennent pas en considération.

En fonction de la source on distingue les erreurs de matériel, les erreurs méthodiques et les erreurs subjectives.

*Les erreurs de matériel ou instrumentales* dépendent des erreurs des moyens utilisés des mesures.

*Les erreurs méthodiques ou théoriques* apparaissent en vertu de l'imperfection des méthodes des mesures, d'utilisations des rapports approchés pris pour base du méthode choisie de mesure, sans tenir compte de l'influence de la série de facteurs sur l'exactitude de la mesure.

*Les erreurs subjectives* sont les erreurs provoquées par l'imperfection des organes de sens de l'opérateur, son inattention à la tenue de la mesure.

En fonction de la signification de la valeur mesurée  $X$  les erreurs se divisent en deux types: les *erreurs additives*, dont la signification absolue ne dépend pas de  $X$ , et les *erreurs multiplicatives*, dont la signification absolue est proportionnelle à  $X$ .

Les sources de l'erreur additive peuvent être : le déplacement du paramètre des appareils de la marque nulle; la friction dans les supports des appareils de mesure, l'inexactitude de la graduation de l'échelle. Les raisons de l'erreur multiplicative – l'influence des facteurs extérieurs (le changement de la température, les champs extérieurs électromagnétiques) et le vieillissement des éléments et les blocs de l' AMÉ.

**8.1.1 Erreurs des mesures.** Les limites des erreurs admises des appareils de mesure électrique sont exprimées en erreurs absolues, relatives et réduite conventionnelles.

*L'erreur absolue* est une différence entre la signification mesurée et valable

$$\Delta X = X_{\text{mes}} - X_{\text{val}}. \quad (8.1)$$

L'erreur absolue est mesurée dans les unités de la valeur mesurée et peut prendre les significations positives, ainsi que les significations négatives.

**L'erreur relative** est une relation de l'erreur absolue à la signification valable de la valeur mesurée

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{\text{val}}} \cdot 100\% . \quad (8.2)$$

L'erreur relative caractérise l'exactitude de la mesure. Elle s'exprime ou dans les unités relatives, ou en pourcentage et peut prendre les significations positives, ainsi que les significations négatives.

**8.1.2 Erreurs des moyens des mesures.** Il faut distinguer les erreurs des mesures et l'erreur d'appareil de mesure, conditionné par sa classe de l'exactitude.

Par le procédé de l'expression on distingue les erreurs des moyens de mesure : absolus et relatifs (similaires aux erreurs de mesure absolues (8.1) et relatives (8.2) ), ainsi que les erreurs réduites conventionnelles.

L'erreur absolue prise avec le signe inverse, s'appelle la correction

$$C = -\Delta X = -(X_{\text{mas}} - X_{\text{val}}) . \quad (8.3)$$

**L'erreur réduite conventionnelle** est une relation de l'erreur absolue à la signification réglant

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_R} \cdot 100\% , \quad (8.4)$$

où  $X_R$  – signification réglant, qui est d'habitude égale à la limite supérieure de l'échelle, à la gamme des mesures ou à la longueur l'échelle, etc.

Pour la plupart des appareils

$$X_R = X_N,$$

où  $X_N$  – limite de la mesure d'un appareil de mesure électrique ou la signification nominale de la valeur mesurée.

L'erreur réduite conventionnelle, comme l'erreur relative, peut s'exprimer soit en unités relatives, soit en pourcentage.

Selon l'indice du caractère du changement on distingue les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles des appareils de mesure, selon l'indice des conditions d'application des appareils de mesure – les erreurs principaux et les erreurs supplémentaires.

L'erreur de base apparaît à appareil de mesure électrique aux conditions normales de l'exploitation, établi par les normes GOST 22261-94 [51] : la température de l'environnement  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  ; la pression atmosphérique  $750 \pm 30$  mm. Hg ; l'humidité relative  $65 \pm 15 \%$ , la tension du réseau d'alimentation  $220 \pm 4,4$  V pour le réseau avec la fréquence de 50 Hz ; la position normale de l'échelle de l'appareil ; l'absence des champs extérieurs électriques et magnétiques, excepté le champ terrestre ; etc.

Les erreurs supplémentaires des appareil de mesure apparaissent au rejet des valeurs influençant (paramètres, énuméré ci-dessus) des significations normales.

Pour la caractéristique des moyens et les méthodes des mesures on applique aussi la notion de la *sensibilité* – la signification minimale du paramètre contrôlé, à qui est capable de réagir l'appareil de mesure.

**8.1.3 Classes de précision des appareils de mesure électrique.** La classe de précision d'un appareil de mesure électrique est la caractéristique généralisée définie par les limites des erreurs admises de bases et supplémentaires, ainsi que par d'autres propriétés du moyen de la mesure, qui influent sur l'exactitude, dont la signification est établie dans les normes sur certains types d'instruments de mesure.

Les moyens principaux du rationnement des erreurs admises et la désignation de la classe de précision des appareils sont établis par les normes GOST 8.401-80 [52]. Sur l'échelle marquent la signification de la classe de l'exactitude de l'appareil en forme d'un nombre, qui indique la signification réglant de l'erreur au %.

Pour les appareils mesurant les valeurs électrotechniques et ayant les limites supérieures, la classe de l'exactitude s'établit selon l'erreur réduite conventionnelle. Pour les moyens des mesures n'ayant pas les limites supérieures, la classe de l'exactitude s'établit selon l'erreur relative.

Conformément aux normes GOST 8.401-80 [52] lors de la définition de la classe de l'exactitude on divise les moyens de mesure en quatre groupes principaux.

**Le premier groupe** – les moyens de mesure dont la composante de l'erreur additive est dominée. Ce sont les appareils montrant et enregistreurs avec l'erreur additive de la friction, de changement de position dans l'espace et d'autres. Pour ce groupe on règle la signification d'erreur exprimée en pourcentage (8.4), qui est utilisé pour la désignation de la classe de précision.

Les appareils de mesure indicateurs ont 8 classes de précision : 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 – les appareils de laboratoire ; 1,0; 1,5; 2,5; 4 – les appareils techniques. Le chiffre qui caractérise la classe de précision, définit l'erreur maximale exprimée en pourcentage, l'erreur principale réduite conventionnelle de l'appareil. Il y a moins de nombre signifiant la précision, plus haut est la classe de précision de l'appareil.

L'erreur relative de AME est définie par le rapport

$$\delta = \pm \gamma \frac{X_N}{X}, \quad (8.5)$$

où :

$\gamma$  – classe de l'exactitude de l'appareil ;

$X_N$  – limite de la mesure de l'appareil ;

$X$  – valeur mesurée.

À partir de l'expression (8.5) il vient que l'erreur relative de la mesure, qui caractérise la précision des mesures, dépend non seulement de la classe de précision de l'appareil, mais aussi de partie de l'échelle où on accomplit la mesure.

N'importe quel appareil de mesure indicateur il est rationnel d'utiliser seulement dans le dernier quart de l'échelle. Dans le cas contraire, même un appareil de la haute classe de précision aura l'erreur relative de la mesure assez grande.

**Le deuxième groupe** – les moyens de mesure, dans lesquels la composante multiplicative de l'erreur prédomine : les diviseurs de tension, les shunts, les transformateurs de mesure du courant et de tension, etc. Dans ce groupe on normalise la limite d'erreur acceptable en pourcentage et la classe de l'exactitude est désignée par le nombre installé au cercle (par exemple,  $\textcircled{1.5}$  montre que l'erreur relative à n'importe quel point n'excède pas  $\pm 1,5\%$ ).

**Le troisième groupe** – les moyens de mesure, dont les erreurs additives et de multiplicatives sont comparées. Ce sont les appareils numériques, les appareils de la comparaison dont équilibrage est manuel ou automatique (les ponts, les compensateurs). Pour ce groupe des appareils la limite de l'erreur relative admissible principale s'exprime avec le rapport

$$\delta = \pm \left[ c + d \left( \frac{X_N}{X} - 1 \right) \right] \%, \quad (8.6)$$

où :

$X$  – valeur mesurée ;

$X_N$  – limite de la mesure de l'appareil ;

$c = \delta_m + \gamma_a$  – nombre constant ;

$\delta_m = \Delta X_m / X_N \cdot 100\%$  – signification relative de l'erreur multiplicatif en pourcentage ;

$d = \gamma_a = \Delta X_a / X_N \cdot 100\%$  – nombre constant, la signification réduite conventionnelle de l'erreur additive exprimée en pourcentage ;

$c/d$  – classe de précision de l'appareil, par exemple 0,02/0,01. Son premier membre  $c$  est égal à l'erreur relative du moyen de la mesure en conditions optima, quand  $X = X_N$ , et le deuxième membre  $d$  caractérise l'augmentation de l'erreur relative des mesures à la réduction  $X$ , c'est-à-dire l'influence de la composante additive de l'erreur.

**Le quatrième groupe** – les moyens des mesures dont la composante additive de l'erreur est prédominante et qui ont une échelle non linéaire nettement exprimée, par exemple, hyperbolique ou logarithmique. Dans ce cas on règle la signification réduite conventionnelle de l'erreur relativement à la valeur maximale de l'échelle. Classe de précision est désignée en forme d'un nombre installé entre deux lignes, disposé sous l'angle, par exemple  $\surd^{1.5}$ . Le chiffre de la classe de précision signifie limite de l'erreur réduite conventionnelle admissible exprimée en pourcentage relativement à l'échelle de l'appareil dans les millimètres.

## 8.2 Classification des méthodes de mesures électriques

En fonction du moyen de la réception du résultat on subdivise les mesure en deux types : directs et indirects.

**Les mesures directes** sont des mesures dans lesquelles la signification cherchée de la valeur physique on définit directement sur l'indication de l'appareil (la mesure du courant par l'ampèremètre, l'énergie électrique par le compteur, la tension par le voltmètre, etc.).



**Les mesures indirectes** sont des mesures dans lesquelles la signification cherchée de la valeur physique on trouve en vertu de la dépendance fonctionnelle connue entre cette valeur et les valeurs reçues à la suite des mesures directes. Par exemple, la définition de la résistance électrique selon les indications de l'ampèremètre et du voltmètre.

En fonction de l'ensemble des accueils de l'utilisation des principes et les moyens des mesures on divise toutes les méthodes en méthodes de l'estimation directe et les méthodes de la comparaison.

**Méthode de mesure directe.** C'est la méthode dans laquelle la valeur de la grandeur mesuré on détermine directement sur indication de l'appareil à lecture direct (la valeur de courant – selon l'indication de l'ampèremètre, la valeur de tension selon l'indication d'un voltmètre et d'autres).

**Méthode de comparaison.** C'est la méthode dans laquelle la valeur mesurée est en spécial circuit de mesurage est comparée à la valeur reproduite par la mesure. Les méthodes de la comparaison subdivisent sur méthode du zero, méthode différentiel et méthode de substitution.

**Méthode du zero.** La méthode de mesure dans laquelle on compare la valeur mesurée avec un étalon et on mène au zéro l'effet résultant de l'influence des valeurs comparées sur l'appareil de comparaison. Lorsque le réglage est terminé, aucun courant ne passe dans cet appareil de comparaison, par exemple un galvanomètre.

**Méthode différentielle.** La méthode de comparaison dans laquelle l'appareil de mesure est influencé par la différence de la valeur mesurée et la valeur reproduite par la mesure (par exemple, la mesure de la résistance électrique à l'aide du pont déséquilibré).

**Méthode de substitution.** La méthode de comparaison dans laquelle la valeur mesurée dans la chaîne de mesure on remplace par la valeur connue reproduite par la mesure. Dans ce cas, par voie du changement de la valeur connue on obtienne la même déclaration de l'appareil, qui a été à l'action de la valeur mesurée (par exemple, la comparaison de la résistance d'un résistor à la résistance de la bobine modèle par leur insertion alternativement à la même épaupe du pont).

### 8.3 Schémas de mesure

Les schémas de mesure et les convertisseur de mesure s'appliquent pour l'insertion définie des capteurs en vue de la mesure des valeurs contrôlées et de la conversion du signal reçu en un signal confortable pour l'utilisation ultérieure et le traitement de ce signal.

Comme il l'a été mentionné, l'erreur de la mesure dépend de la classe de précision de l'appareil de mesure et de la relation de la signification de la valeur maximale de l'appareil vers la signification valable de la valeur mesurée.

Les schémas de mesure se caractérisent par une haute sensibilité. Lors de la mesure des petites valeurs la sensibilité de la méthode de la mesure acquiert une

importance particulière, en définissant souvent la possibilité de la mesure. La sensibilité de la méthode de mesure est définie par l'expression

$$S = S_{sch} \cdot S_{app}, \quad (8.7)$$

où :

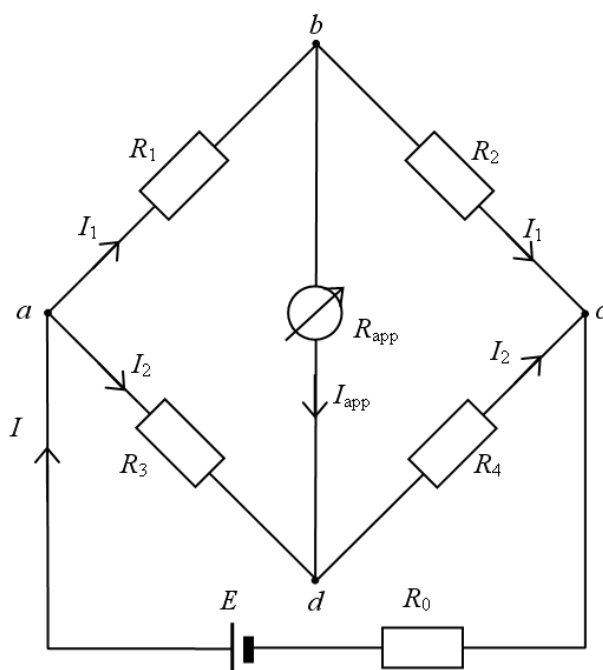
$S_{sch}$  – sensibilité du schéma ;

$X_N$  – sensibilité de l'appareil de mesure.

Ainsi, augmenter la sensibilité de la méthode de mesure on peut par l'augmentation de la sensibilité du schéma de mesure, ainsi que par le choix des appareils de mesure correspondants.

En pratique, pour améliorer la sensibilité de mesure on utilise les schémas suivants : schéma de pont, de compensation et différentiels.

**8.3.1 Schéma du pont de mesure.** Le schéma de mesure constitué d'au moins quatre branches (bras) ou groupes d'éléments de circuit (résistances, inductances, condensateurs) connectés en quadrilatère dont l'une des diagonales est alimentée par une source et l'autre est connectée à un appareil détecteur de zéro ou à un appareil de mesure. On l'appelle le schéma du pont de mesure ou simplement le pont (fig. 8.1). Ce schéma est utilisée pour la transformation du changement de la résistance du capteur au changement de l'amplitude de la tension. La résistance du capteur (actif, inductif ou capacitif) change en proportion du changement du paramètre technologique contrôlé, par exemple de la température.



**Figure 8.1** – Schéma du pont

Il existe deux types principaux de ponts :

à l'équilibre, ou balancé, le couplage en pont supposant la méthode nulle de la mesure ;

schéma non équilibré, ou non balancé, le couplage en pont supposant la mesure par la méthode du décompte direct selon l'appareil de mesure, inséré dans une diagonale du pont. Pour la mesure des valeurs non électriques par les méthodes électriques on utilise le plus souvent le deuxième type de couplage en pont. Dans les cas où la tâche du couplage en pont n'est pas la mesure, mais la gestion de quelque procès, on utilise le premier type de couplage en pont.

Les couplages en pont peuvent fonctionner en courant continu et en courant alternatif.

Dans le fonctionnement du couplage en pont l'important moment est la condition de l'équilibre, qui pour le schéma à courant continu (fig. 8.1) est défini dans la relation suivante :

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (8.8)$$

Lorsque la condition (8.8) est remplie, le courant dans la diagonal du pont  $I_{app} = 0$ . Une des épaules du pont contient un capteur, dont la résistance active change en proportion du changement du paramètre contrôlé. La condition d'équilibre est rompu, et dans la diagonale du pont bd à travers un dispositif de mesure passe le courant dont l'amplitude est proportionnelle à la valeur du paramètre contrôlé.

En cas du couplage en pont alimenté du courant alternatif, la condition de l'équilibre s'écrit ainsi :

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \quad (8.9)$$

où  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  sont les résistances complexes des épaules du couplage en pont.

Ayant inscrit ces résistances sous la forme suivante

$$Z_1 = R_1 + j X_1, \quad Z_2 = R_2 + j X_2, \quad Z_3 = R_3 + j X_3 \quad \text{et} \quad Z_4 = R_4 + j X_4, \quad (8.10)$$

où :

$R_1, R_2, R_3, R_4$  – résistances actives des branches du schéma ;

$X_1, X_2, X_3, X_4$  – résistances réactives des branches du schéma ;

nous recevrons les conditions de l'équilibre (8.8) pour le schéma en courant alternatif

$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3, \\ R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2. \end{cases} \quad (8.11)$$

La difficulté du réglage du couplage en pont en courant alternatif consiste en ce qu'après l'exécution de la condition de l'équilibre (8.9) il faut encore satisfaire aux conditions (8.11), sans rompre la première condition. Un tel réglage est possible seulement par la méthode des approximations successives, quand au départ on obtient l'intensité du courant minimale, en réglant un paramètre, puis on obtient la réduction encore plus grande  $i_{app}$ , en réglant un autre paramètre, etc., en diminuant successivement  $i_{app}$  jusqu'au zéro.

Le réglage d'équilibre d'un pont sur le courant alternatif est simplifié dans les cas suivants.

1. Si on a seulement les résistances réactives, lorsque les résistances actives sont égales à zéro (ce qui est possible uniquement lors de l'application des condensateurs). Dans ce cas, il ne reste qu'une condition d'équilibre

$$X_1 \cdot X_4 = X_2 \cdot X_3. \quad (8.12)$$

2. Si dans les épaules du pont on insère seulement les résistances actives. Alors la condition de l'équilibre est définie seulement par l'égalité

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (8.13)$$

3. Si deux épaules voisines ont seulement la résistance actif, et les deux autres – seulement la résistance réactive (ce qui est possible lors de l'application des condensateurs). Dans ce cas, il reste une seule condition :

$$X_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot X_3, \quad (8.14)$$

si  $R_1 = R_3 = X_2 = X_4 = 0$ .

La sensibilité en courant du schéma d'équilibré du pont en cas de la résistance  $R$  variable est définie de l'expression

$$S''_{sch} = \Delta i_{app} / \Delta R_1 = i \cdot R_4 / N = U \cdot R_4 / M, \quad (8.15)$$

et en tension

$$S''_{sch} = \Delta U_{app} / \Delta R_1 = \Delta i_{app} R / \Delta R_1 = i \cdot R_{app} \cdot R / N = U \cdot R_{app} \cdot R_4 / M, \quad (8.16)$$

où :

$\Delta R_1$  – changement de la résistance  $R_1$  (une des épaules) ;

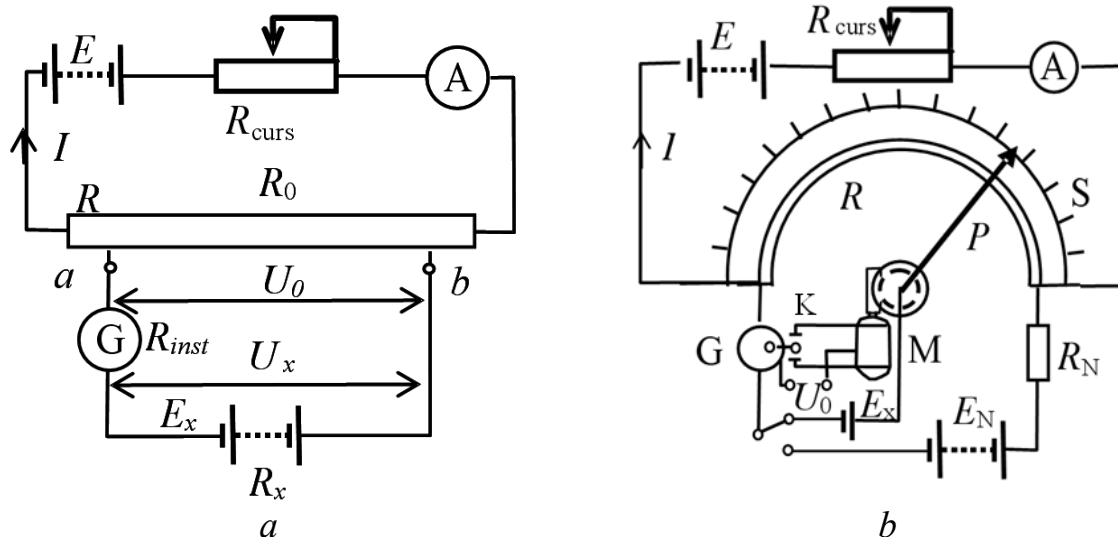
$M, N$  – résistances des épaules, qui dépendent du moyen de l'insertion des capteurs ;

$U$  – tension d'alimentation du couplage en pont ;

$i$  – intensité du courant consommée par le couplage en pont de la source d'alimentation.

Ainsi, *l'augmentation de la sensibilité du couplage en pont on peut obtenir par l'augmentation de la tension d'alimentation et par changement des moyens de l'insertion des capteurs.*

**8.3.2 Schéma de compensation.** Le principe de la compensation consiste en ce que la f.é.m. mesurée (ou la tension) est équilibrée par la chute de potentiel égale et opposée selon le signe, dont la signification peut être établie et définie avec une haute exactitude. La chute de potentiel équilibrant se photographie du potentiomètre et est fixé par la position du curseur (fig. 8.2).



**Figure 8.2** – Chaîne de mesure par compensation

On établit le curseur ou à la main, en contrôlant les indications selon le galvanomètre (fig. 8.2, a), ou il s'établit automatiquement au moyen de l'électromoteur  $M$  dirigé par galvanomètre  $G$  (fig. 8.2, b). Ce dernier schéma est appelé autocompensation, et on l'utilise presque dans tous les appareils fonctionnant selon la méthode de compensation.

Le système mobile du galvanomètre nul  $G$  (fig. 8.2, b) a au lieu de la flèche un contact, qui à l'apparition dans le galvanomètre du courant en fonction de sa

sens se renferme avec le contact supérieur ou inférieur immobile K. Lors de cela l'électromoteur M démarre et déplace le curseur du rhéostat  $R$  jusqu'à ce que l'intensité du courant dans le galvanomètre ne devienne pas de nouveau égale à zéro. Alors les contacts seront ouverts, l'électromoteur s'arrêtera et le curseur du rhéostat restera dans la position correspondant à la condition de compensation jusqu'à ce que la f.é.m. mesurée de nouveau ne changera pas sa valeur. Alors le processus décrit se répétera et le curseur se déplacera à une nouvelle position correspondant à la nouvelle position de la compensation. Le déplacement du curseur est transmis mécaniquement sur le pointeur  $P$  qui montre sur une échelle de  $S$  la valeur mesurée de la f.é.m., ou sur le chariot avec la plume d'un mécanisme d'enregistrement (ou sur les deux à la fois).

La condition de la compensation peut être inscrite comme :

$$\Delta i_{app} = (U_x - U_0)/(R_{ab} + R_x + R_{app}) = 0, \quad (8.17)$$

c'est-à-dire  $U_x - U_0 = 0$ , d'où  $U_x = U_0 = i \cdot R_x$ , où  $i = \text{const.}$  La tension  $U_x$  (f.é.m. du thermocouple) au moment de la compensation est toujours proportionnelle à  $R_0$ , et donc au déplacement du curseur.

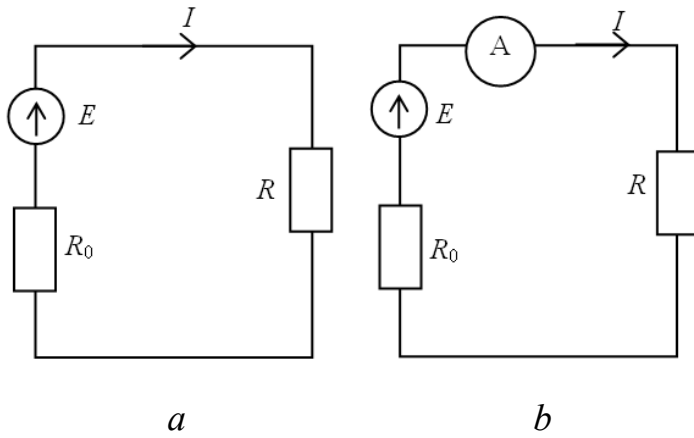
#### 8.4 Mesure du courant et de la tension

Comme était indiqué dans le chapitre 7.4.1, pour la mesure du courant dans quelque élément de la chaîne (fig. 8.3, *a*) on branche avec lui en seri l'appareil de mesure de courant – l'ampèremètre (fig. 8.3, *b*).

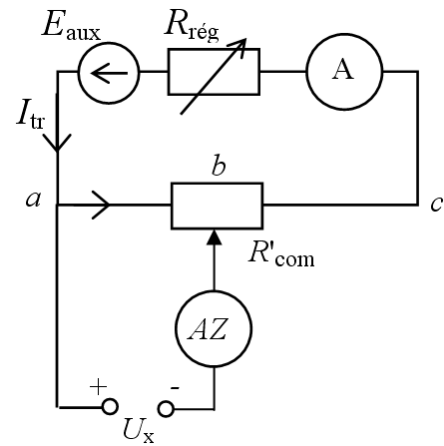
Lors de la mesure des petits courants continus (moins de  $10^{-3}$  A) on utilise les méthodes de mesure directes et indirectes. Dans le premier cas, on mesure le courant par les appareils magnétoélectrique à aiguille mobile, pour l'augmentation de la sensibilité duquels on utilise généralement les amplificateurs du courant continu.

Plus exacte est une mesure indirecte du courant. Dans ce cas on insère dans la chaîne mesurée une résistance étalonée dont la résistance  $R_{\text{étal}}$  et on mesure la chute de potentiel sur cette résistance par la méthode de compensation. La figure 8.4 montre le schéma de principe de mesure de la tension l'inconnu  $U_x$  par la méthode de compensation. Dans le contour supérieur sous l'effet de la f.é.m. de la source d'alimentation auxiliaire  $E_{\text{aux}}$  il y a un courant de travail  $I_{\text{tr}}$  dont la valeur est réglée par la résistance  $R_{\text{rég}}$  et est mesuré par l'ampèremètre A. Dans le contour inférieur la tension mesuré  $U_x$  est équilibré par la chute de potentiel sur la résistance compensant  $R'_{\text{com}}$  par les changements de la position du curseur  $b$ . Lors de la compensation, quand  $U_x = R'_{\text{comp}} \cdot I_{\text{tr}}$ , le courant de appareil de zéro AZ devient égal à zéro, ce qui correspond à l'infiniment grande résistance d'entrée de l'installation de mesure.

La chaîne de mesure par compensation fonctionne sans sélection de l'énergie de l'objet de la mesure. En connaissant  $R'_{\text{com}}$  et  $I_{\text{tr}}$ , on peut définir  $U_x$ .



**Figure 8.3** – Mesure de courant dans le circuit par l'ampèremètre

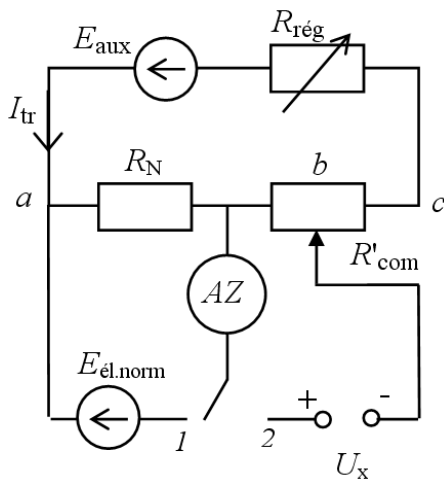


**Figure 8.4** – Mesure indirecte de courant par compensation

Les appareils, qui réalisent la méthode de compensation de la mesure (voir le chapitre 8.3.2), s'appellent potentiomètres. Aux derniers le courant de travail s'établit non selon l'ampèremètre, mais par la méthode de compensation avec l'utilisation d'un élément normal, dont la F.E.M. est connue avec un haut degré de l'exactitude (fig. 8.5). En réglant la résistance du résistor  $R_{\text{rég}}$  on obtienne l'absence du courant dans un appareil de zéro (le commutateur dans la position 1). Dans ce cas, nous avons l'égalité :

$$R_N \cdot I_p = E_{\text{él.norm}} , \quad (8.18)$$

où  $R_N$  – résistance du résistor étaloné.



**Figure 8.5** – Schéma du potentiomètre

Car la force électromotrice du élément normale et de la résistance  $R_N$  sont connus avec une grande précision, la valeur du courant  $I_{\text{tr}} = E_{\text{él.norm}}/R_N$  est également connue avec une grande précision.

À la position du commutateur 2 la tension mesurée  $U_X$  est comparé à la tension compensant  $U_C$ , créé par le courant  $I_{\text{tr}}$  dans la résistance compensant  $R'_{\text{comp}}$ . En l'absence du courant dans appareil de zéro  $AZ$  la tension  $U_X$  est équilibré par la tension  $U_C$ , i.e.

$$U_X = U_C = R'_{\text{com}} \cdot I_{\text{tr}} = \frac{R'_{\text{com}}}{R_N} \cdot E_{\text{él.norm}} . \quad (8.19)$$

De (8.19) on voit que l'exactitude de la mesure  $U_X$ , à une telle méthode des mesures est définie par l'exactitude de la valeur  $U_{\text{comp}}$ , par l'exactitude de sa comparaison avec  $U_x$ , i.e. par la sensibilité, par la constance du courant de travail  $I_{\text{tr}}$ , par la stabilité  $E_{\text{aux}}$ . À son tour, l'exactitude  $U_{\text{com}}$  dépend de l'exactitude de la fabrication des résistances  $R_{\text{com}}$ . Les derniers dans les

potentiomètres modernes on effectue sous la forme des boîtes de résistances à décades de grande stabilité. Les potentiomètres produits par l'industrie ont les classes de l'exactitude : 0,0005 ; 0,001 ; 0,002 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,02 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5. La tension maximale, mesurée par un potentiomètre directement, fait 2,12111 V.

On mesure les courants continus de l'ordre de  $10^{-3}$ – $10^2$  A aussi avec les méthodes directes et indirectes. Aux mesures directes on utilise des milliampèremètres et des ampèremètres magnétoélectriques, électromagnétiques et électrodynamiques, ainsi que les appareils électroniques analogiques et les appareils numériques. Aux mesures indirectes on définit le courant par la chute de potentiel mesurée sur une résistance étalonnée à l'aide des potentiomètres du courant continu et des voltmètres numériques.

La mesure des courants continus de forte intensité (plus de 100 A) on réalise d'habitude par les ampèremètres du système magnétoélectrique avec l'utilisation des shunts (fig. 7.2).

Lors de la mesure des courants alternatifs il est nécessaire de se rappeler quelle valeur du courant est mesurée avec l'appareil : efficace, de l'amplitude ou moyenne. Cela est dû au fait que généralement tous les appareils sont gradués dans les valeurs efficaces du courant sinusoïdal, et les parties mobiles des appareils de mesure des mécanismes des systèmes différents réagissent sur les valeurs qui sont différentes des valeurs efficaces.

On mesure les courants alternatifs jusqu'à 100  $\mu$ A généralement avec les microampèremètres numériques, les courants de plus de 100  $\mu$ A – avec les microampèremètres avec redressement. Pour mesurer des courants alternatifs dans la gamme 10 mA – 100 A on utilise les appareils électromagnétiques, électrodynamiques et les appareils avec redressement fonctionnant aux fréquences allant jusqu'aux dizaines de kilohertz, et les appareils thermoélectriques dans la gamme de fréquences jusqu'aux centaines de mégahertz. La mesure des courants alternatifs de forte intensité on réalise par les mêmes appareils, mais avec l'utilisation de transformateurs de mesure de courant (fig. 7.14).

Encore on mesure les courants alternatifs par la méthode de mesure indirecte. Dans ce cas on connecte la résistance étalonnée successivement dans la chaîne de mesure, et on mesure la chute de tension sur elle à l'aide des voltmètres. L'exactitude de la mesure augmente, mais par rapport à l'exactitude de la mesure sur le courant continu elle est plus basse.

Lors des mesures directes et indirectes du courant l'insertion à la chaîne mesurée de l'appareil de mesure avec la résistance intérieure  $R_A$  change le mode de la chaîne étudiée. Sur la figure 8.3 on montre les schémas de la chaîne jusqu'à et après l'insertion de l'ampèremètre. Le courant  $I$  après l'insertion de l'appareil de mesure devient égal  $I_A$ . La variation relative du courant dans ce cas on caractérise par l'erreur de la méthode de la mesure ou l'erreur méthodique de la mesure du courant :

$$\delta_I = \frac{-1}{1 + R_{\text{entr. A}} / R_A}, \quad (8.20)$$

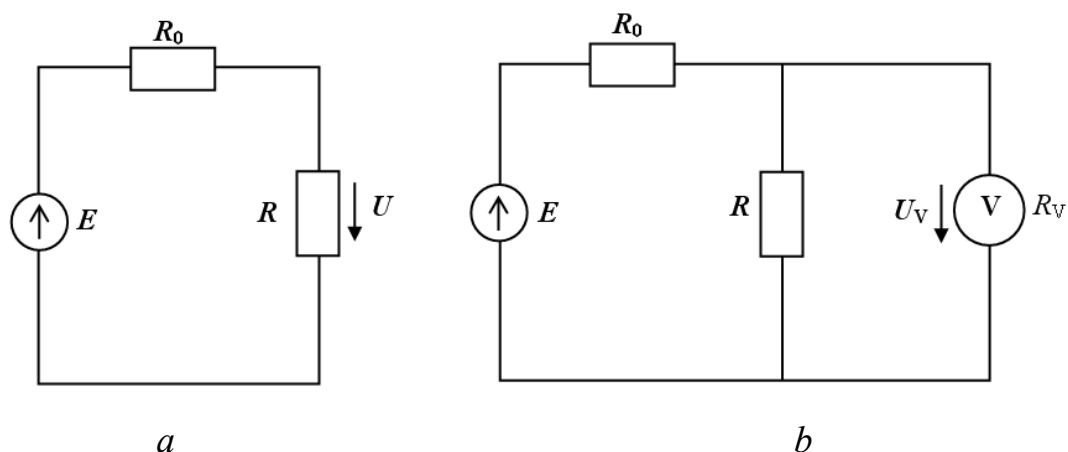
c'est-à-dire, l'insertion de l'ampèremètre diminue le courant mesuré de la signification dépendant de la relation  $R_{\text{entr. A}}/R_A$ .

Comme nous avons indiqué dans le chapitre 7.4.2, pour la mesure de la F.E.M. et de la tension  $U$  sur une section de la chaîne électrique (fig. 8.6, *a*) on insère l'appareil de mesure de la tension parallèlement à cette section (fig. 8.6, *b*).

Lors de la mesure de très basse tension continu (de l'ordre de  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  V) on utilise les galvanomètres magnéto-électriques. On obtienne les résultats plus précis lors de la mesure de la tension dans la gamme 1–1000  $\mu$ V à l'aide des potentiomètres à courant continu et des mikrovoltmètres numériques.

Les valeurs de la tension continue de quelques dizaines de millivolts à des centaines de volts on mesure avec les appareils de systèmes magnéto-électriques, électrodynamiques, électromagnétiques, les appareils d'électroniques analogiques et numériques, potentiomètres à courant continu avec des résistances supplémentaires et des diviseurs de tension.

Pour la mesure des tension continu à plusieurs kilovolts on utilise principalement les voltmètres électrostatiques, ainsi que des instruments d'autres systèmes avec des diviseurs de tension.



**Figure 8.6** – Mesure de tension avec un voltmètre

Les faibles tensions alternatives (jusqu'aux unités de volts) on mesure à l'aide des appareils à redresseur, les voltmètres analogiques électroniques. Plus grande précision on reçoit lors de la mesure de tension à l'aide des potentiomètres de courant alternatif, des voltmètres numériques.

Pour la mesure des tensions alternatives des unités à plusieurs centaines de volts dans la gamme de fréquences jusqu'à des dizaines de kilohertz on utilise des instruments électromagnétique, électrodynamique, les appareils à redresseur, les potentiomètres à courant alternatif. Dans la gamme de fréquences jusqu'à des dizaines de mégahertz pour la mesurage de tensions on utilise les appareils électrostatique et thermoélectrique, les voltmètres numériques.

Pour la mesure des tensions alternatives de grand valeur on utilise les mêmes appareils, mais avec l'application des transformateurs de mesure de tension (voir la figure 7.14). Les transformateurs de mesure, excepté la transformation de tension variable, isolent la chaîne secondaire de chaîne primaire, qui est sous une haute tension.



Lors de la connexion de l'appareil de mesure de tension à la section de la chaîne électrique avec la résistance  $R$  (fig. 8.6), le régime de son travail change. La chute de tension de cette section devient égal  $U_V$ . On caractérise le changement relatif de la tension par *l'erreur de la méthode de la mesure* ou *l'erreur méthodique de la mesure de la tension* :

$$\delta_V = \frac{-1}{1 + R_V / R_{\text{entr.V}}}, \quad (8.21)$$

c'est-à-dire, l'insertion du voltmètre diminue la tension mesurée à la signification dépendant de la relation  $R_V / R_{\text{entr.V}}$ . Nous marquerons que **la mesure de la tension par un potentiomètre n'a pas l'erreur méthodique de la mesure**.

À l'heure actuelle on utilise les potentiomètres automatiques, qui sont fondés sur la méthode de compensation de la mesure et largement appliqués pour la mesure des valeurs non électriques, préalablement transformé en tension.

## 8.5 Mesure de la puissance et de l'énergie électrique

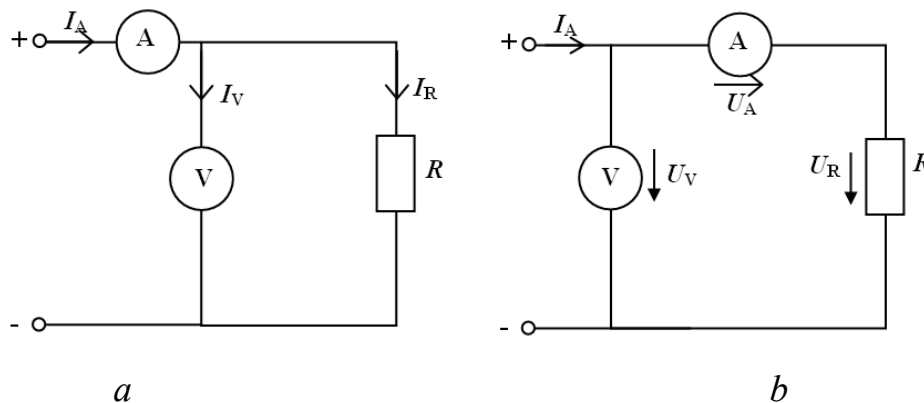
On réalise la mesure de la puissance à l'aide des méthodes directes et indirectes. À la méthode directe on utilise les wattmètres, à la méthode indirecte – les ampèremètres et les voltmètres.

### 8.5.1 Mesure de la puissance en courant continu

Dans les chaînes du courant continu on mesure la puissance par la méthode de l'ampèremètre-voltmètre. Ayant mesuré avec un ampèremètre le courant  $I$  et avec un voltmètre la tension  $U$  (voir la figure 8.7), on calcule la puissance du récepteur

$$P = U \cdot I. \quad (8.22)$$

Pour la réduction de l'erreur à cause de l'influence des résistances intérieures des appareils il faut utiliser le schéma (fig. 8.7, a) aux petites significations de la résistance  $R$ , et le schéma (fig. 8.7, b) – à grand  $R$ .



**Figure 8.7** – Mesure de la puissance par la méthode de l'ampèremètre-voltmètre

On réalise assez rarement la mesure de la puissance à l'aide de wattmètre dans les chaînes du courant continu.

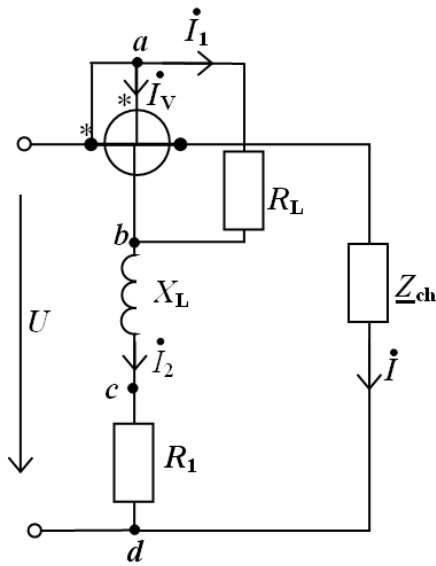
**8.5.2 Mesure de la puissance en courant monophasé.** En général, on mesure la puissance apparente d'un récepteur par la méthode de l'ampèremètre-voltmètre :

$$S = U \cdot I, \quad (8.23)$$

où  $U$  et  $I$  sont les valeurs réelles de la tension et du courant.

La puissance active  $P = U \cdot I \cos \varphi$  et réactive  $Q = U \cdot I \sin \varphi$  des récepteurs on mesure à l'aide des wattmètres et des warmètres. Comme les wattmètres on utilise les appareils électrodynamiques et ferrodynamiques, comme les warmètres – les appareils électrodynamiques.

La figure 8.8 montre un schéma de l'insertion du wattmètre pour la mesure de la puissance active dans les chaînes du courant alternatif monophasé.



**Figure 8.8** – Schéma de l'insertion du wattmètre

La mesure de la puissance réactive dans les chaînes à une phase on réalise à l'aide des wattmètres réactifs appelés warmètres. Dans ces appareils il y a un déphasage artificiel sur  $90^\circ$  entre la tension  $U$  sur le récepteur et le courant  $I_V$  dans le bobinage de la tension de l'appareil. Du schéma de la figure 8.8 on voit qu'en série avec le bobinage parallèle  $R_{WV}$  de l'appareil et la résistance supplémentaire  $R$  on insère la bobine inductive avec la résistance  $X_L$ , et parallèlement vers ce bobinage (les bornes  $a$  et  $b$ ) on connecte une résistor avec la résistance  $R_L$ . Alors, à la sélection correspondante des paramètres, le

courant  $\dot{I}_V = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$  est déphasé par rapport à la tension d'exactement sur  $90^\circ$ . En

conséquence, le moment tournant s'avère proportionnel  $\sin \varphi$  (où  $\varphi$  est l'angle du déphasage entre la tension et le courant de l'électrorécepteur), c'est-à-dire le couple est proportionnel à la puissance réactive  $Q = U \cdot I \sin \varphi$ .

**8.5.3 Mesure de la puissance dans les circuits triphasés.** La puissance du système triphasé est égale à la somme des puissances consommées par les charges de chaque phase :

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (8.24)$$

En cas de la charge triphasée équilibrée la puissance totale active est égale à la puissance triplée de quelque phase :

$$P = 3P_{ph} = 3I_{ph} \cdot U_{ph} \cdot \cos \varphi, \quad (8.25)$$

où  $U_{ph}$  et  $I_{ph}$  sont la tension et le courant de phase.

Si les significations de la tension et du courant de phase s'expriment par les significations linéaires, nous recevrons :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (8.26)$$

où  $U$  et  $I$  sont la tension et le courant de lignes.

**Mesure de la puissance active.** Pour mesurer la puissance active triphasée on utilise divers moyens.

**La méthode d'un wattmètre** on applique pour la mesure de la puissance en cas de charge symétrique à quatre ou trois fils de la ligne, si le point neutre (nul) de la charge (fig. 8.9) est accessible pour la connexion. Dans ce cas la puissance totale est égale à la déclaration triplée du wattmètre :

$$P = 3I_{ph} \cdot U_{ph} \cdot \cos\varphi. \quad (8.27)$$

**La méthode d'un wattmètre avec la création d'un point artificiel nul** est appliqué pour la mesure de la puissance de charge symétrique dans les cas où le point nul (neutre) de l'électrorécepteur est inaccessible ou manque en général (par exemple, dans le couplage en triangle). En ce cas dans une des phases on insère le bobine de courant du wattmètre, et le point nul (neutre) on reçoit par l'insertion de deux résistances identiques  $R_d$  entre deux autres phases (voir la figure 8.10). Dans ce cas la puissance totale est égale à la déclaration triplée du wattmètre.

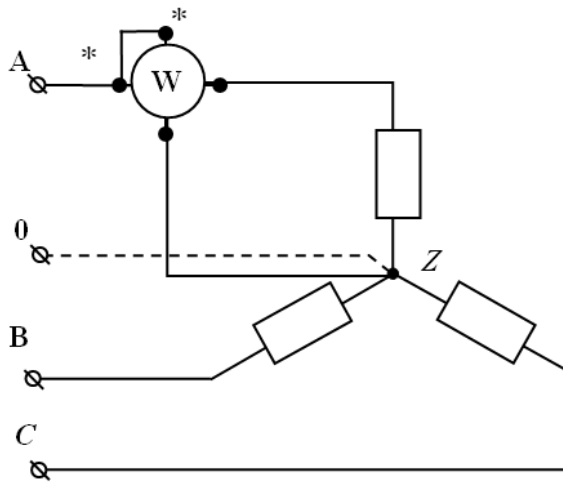


Figure 8.9 – Méthode d'un wattmètre

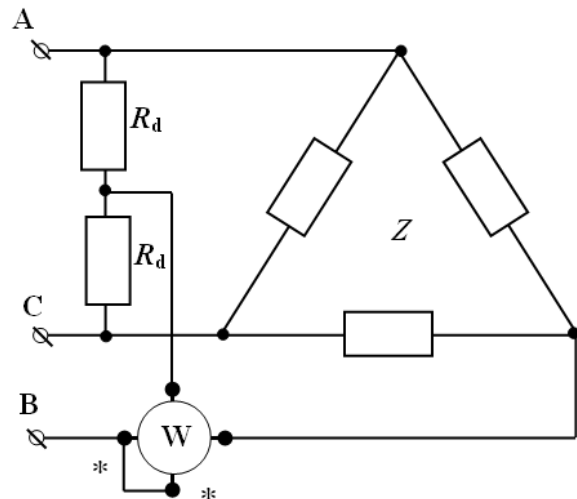


Figure 8.10 – Méthode d'un wattmètre avec le point artificiel nul

**La méthode des trois wattmètres** on applique pour la mesure de la puissance du circuit équilibré à quatre lignes (fig. 8.11). La puissance totale dans ce cas est égale à la somme des déclarations de tous trois wattmètres.

**La méthode des deux wattmètres** peut être appliqué dans les réseaux à trois lignes dans tous les cas lors de la mesure de la puissance des récepteurs triphasés (fig. 8.12). Selon ce schéma on insère les bobines de courant des wattmètres dans quelques deux phases, et les bobines de tension entre la troisième phase (vacante) et la phase, dans laquelle est inséré la bobine du wattmètre donné. La puissance totale est égale à la somme des déclarations des deux wattmètres.

Il faut avoir en vue qu'au déphasage plus  $60^\circ$  (le travail des machines électriques en régime de la marche à vide) la flèche du premier wattmètre s'écartera en sens inverse du zéro. Pour le décompte des significations négatives de la puissance selon le premier wattmètre on commute les bornes d'un de ses bobines (de courant ou

de tension), et la puissance totale dans ce cas est égale à la différence des déclarations des wattmètres

$$P = P_2 - P_1. \quad (8.28)$$

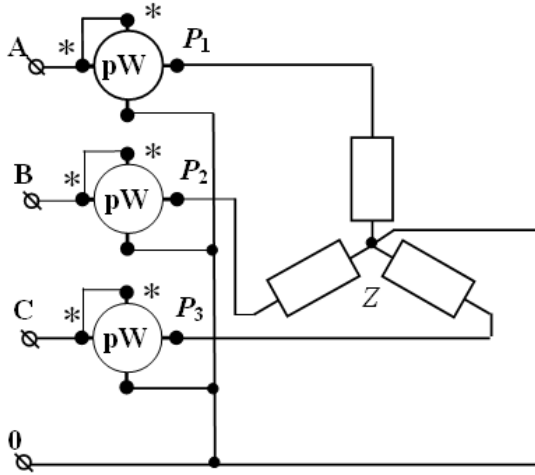


Figure 8.11 – Méthode des trois wattmètres

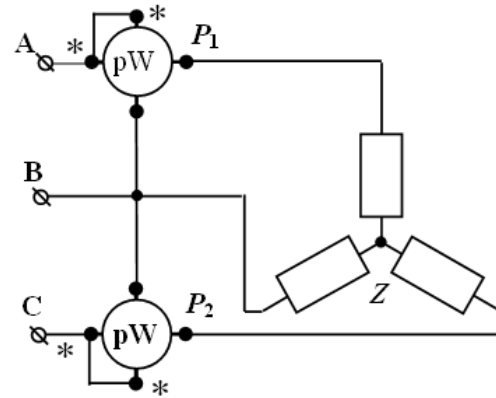


Figure 8.12 – Méthode des deux wattmètres

En utilisant la méthode des deux wattmètres en cas de la charge symétrique on peut calculer selon les déclarations des appareils  $\tan \varphi$ , puis  $\varphi$  et  $\cos \varphi$

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}. \quad (8.29)$$

La méthode des deux wattmètres est largement utilisé en pratique. Cependant, il est beaucoup plus confortable de mesurer la puissance des récepteurs triphasés avec un wattmètre triphasé à deux éléments dans lequel sont unis deux wattmètres à une phase qui agissent par ses couples sur l'axe commun des deux systèmes de mesure.

**Mesure de la puissance réactive.** Pour la mesure de la puissance réactive du système triphasé en cas de la charge symétrique on peut se servir d'un wattmètre de la puissance active, ayant inséré la bobine de courant dans une des phases, et la bobine de tension – entre deux autres phases (fig. 8.13, a).

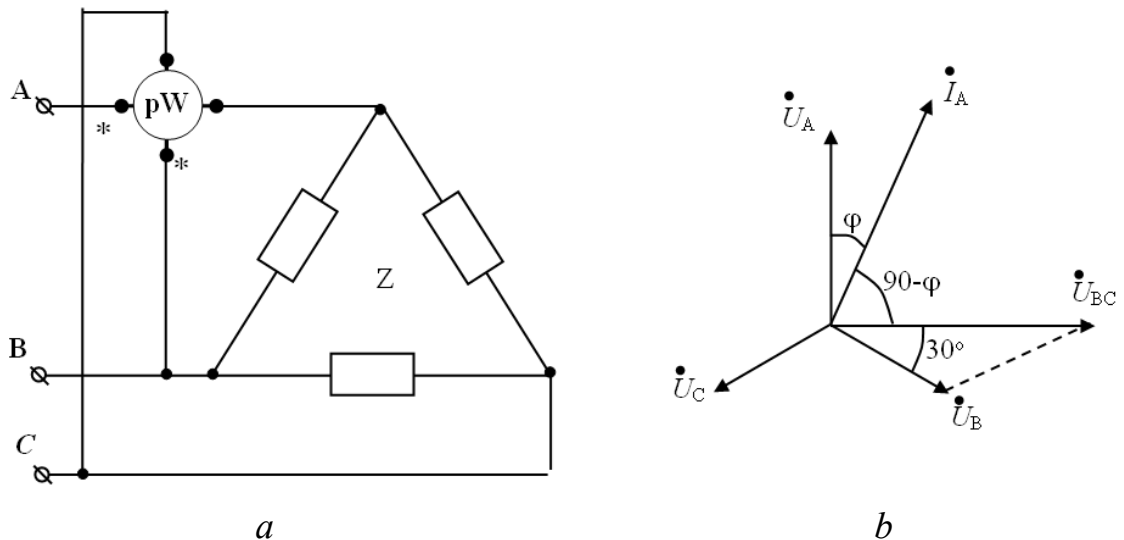
Le diagramme vectoriel (fig. 8.13, b) explique le principe de la mesure de la puissance réactive pour le cas donné. La puissance mesurée par le wattmètre sera définie par le rapport suivant

$$P = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = I_{comp.} \cdot U_{comp.} \cdot \sin \varphi. \quad (8.30)$$

où  $U$  et  $I$  sont la tension et le courant composé.

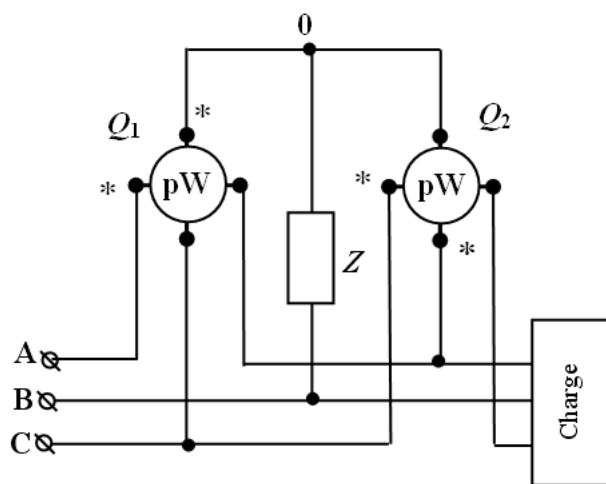
Ayant multiplié les déclarations du wattmètre sur  $\sqrt{3}$ , on reçoit la puissance totale réactive de la chaîne triphasée

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (8.31)$$



**Figure 8.13** – Mesure de la puissance réactive à l'aide d'un wattmètre

En pratique on utilise les wattmètres triphasés réactifs connectés selon le schéma de deux wattmètres (fig. 8.14).



**Figure 8.14** – Mesure de la puissance réactive d'un électroconsommateur triphasé

Pour l'insertion des bobines de la tension sur la tension de phases il y a ici un point artificiel nul 0 formé par les résistances de deux bobines de tension et la résistance supplémentaire Z. La puissance totale réactive de la charge triphasée est définie comme la somme des déclarations de deux wattmètres multiplié sur  $\sqrt{3}$

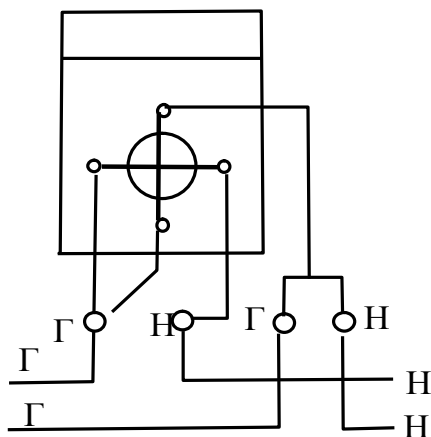
$$Q = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2). \quad (8.32)$$

**8.5.4 Mesure de l'énergie électrique.** On mesure l'énergie active électrique dans les chaînes du courant alternatif avec les compteurs à induction insérées selon les schémas qu'on utilise pour l'insertion des wattmètres. La figure 8.15 montre un schéma de l'insertion du compteur à induction de l'énergie active à une phase.

Les compteurs à induction sont produits à une phase et à triphasé. L'élargissement des limites de la mesure est atteint par l'insertion des compteurs à la chaîne à l'aide des transformateurs de mesure.

Pour l'enregistrement de l'énergie active dans les réseaux triphasés sont appliqués largement les compteurs à deux éléments représentant l'ensemble de

deux compteurs monophasé à induction, dont les moments tournant agissent sur l'axe et l'élément indicateur du compteur. À la base on met la méthode donnant la possibilité à l'aide de deux compteurs (wattmètres) définir l'énergie (puissance) totale, consommé au système triphasé.



**Figure 8.15** – Schéma de l'insertion du compteur à induction monophasé

En pratique on utilise aussi les compteurs triphasés d'énergie réactive. La comptabilité de l'énergie réactive est dicté par la nécessité de la définition des valeurs moyennes de  $\cos\varphi$ , pris pour base des tarifs promotionnels et des amendes, qui s'établissent pour les consommateurs de l'énergie électrique. Le tarif d'amende pour l'excès de la limite de la consommation de l'énergie réactive contribue à la réduction par les grands consommateurs industriels de la puissance réactive de ses installations, et, par conséquent, de réduire les pertes de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution de haute tension.

Selon l'exactitude les compteurs sont divisés en classes suivantes : 1,0 ; 2,0 ; 2,5 (les compteurs de l'énergie active) et 2,0 ; 3,0 (les compteurs de l'énergie réactive).

## 8.6 Mesure des valeurs non électriques

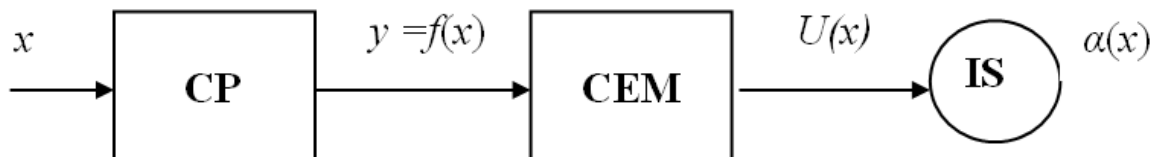
Dans la pratique de génie lors du contrôle des différents processus de production il faut mesurer souvent des valeurs non électriques : mécanique (la force, la pression, la vitesse etc.), thermique (la température, la capacité thermique etc.), lumineux (les éclairages, le flux lumineux etc.).

Pour le contrôle et la gestion des valeurs non électriques on utilise largement les méthodes électriques et les appareils de mesure électriques. Ils permettent de recevoir données avec un haut degré de l'exactitude et dans une large gamme du changement des significations des valeurs, de définir les caractéristiques des objets se trouvant sur grandes distances et dans les places peu accessibles, d'étudier les procès passant vite, de mémoriser les résultats de mesure à l'aide des ordinateurs ou des systèmes d'information, etc.

Pour mesurer n'importe quelle valeur non électrique, préalablement il faut la transformer en signal électrique. Une telle transformation se réalisent à l'aide des capteurs ou des convertisseurs primaires.

La figure 8.16 montre le schéma bloc d'un dispositif pour la mesure de la valeur non électrique par la méthode électrique. Sur la figure : CP – convertisseur primaire, CEM – la chaîne électrique de mesure, IS – l'installation

de sortie. La valeur mesurée non électrique  $x$  entre à l'entrée du CP, à la sortie duquel apparaît un signal électrique  $y = f(x)$ . Ensuite, ce signal sera transformé en CEM dans un autre signal électrique  $U(x)$ , qui sera perçu par IS, à la suite de quoi sur la sortie de toute l'installation se trouvera, par exemple, l'écart de pointeur  $\alpha(x)$ . L'échelle de l'installation de sortie est directement graduée dans les significations de la valeur non électrique  $x$ .



**Figure 8.16** – Chema bloc d'un dispositif de la mesure des valeurs non électrique

Les convertisseurs primaires (CP), utilisés dans les mesures, sont extrêmement divers selon l'installation et le principe de l'action. Ils sont divisés en convertisseurs générateurs et convertisseurs paramétriques.

Les convertisseurs générateurs élaborent la f.é.m. ou le courant, et ils, en général, ne demandent pas la source d'alimentation supplémentaire pour son travail. Aux convertisseurs générateurs se rapportent : les convertisseurs thermiques, les convertisseurs à induction, les convertisseurs piézo-électriques, galvaniques et une série d'autres.

Les convertisseurs paramétriques transformeront le changement de la valeur mesurée non électrique en changements de n'importe quel paramètre de la chaîne électrique ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), et pour son fonctionnement ils demandent une source d'alimentation supplémentaire. Les convertisseurs paramétriques ce sont : thermorésistances, piézorésistances, convertisseurs à rhéostat, transducteurs inductifs et capacitifs etc. Il est possible de mesurer la même valeur non électrique à l'aide de différents convertisseurs paramétriques.

Les chaînes électriques de mesure dans les appareils examinés se composent d'habitude des ponts ou des potentiomètres de mesure. Dans le cas le plus simple la chaîne électriques peut être absente, et le signal  $y = f(x)$  provient directement à l'appareil de sortie.

Les installations de sortie (IS), utilisé aux mesures des valeurs non électriques, sont tout à fait différentes de millivolmètre magneto-électrique à aiguille jusqu'à l'appareil enregistreur avec l'inscription à la mémoire de l'ordinateur. En cas de l'enregistrement du grand nombre de simultanément contrôlés des valeurs, les signaux de tous IS entrent à un point de contrôle ou dans un système de mesure informatique.

## **Conclusions principales**

1. Toutes les mesures des valeurs électriques et non électriques sont accomplies avec une certaine erreur définie par la méthode des mesures, la sensibilité et la classe de l'exactitude de l'appareil de mesure.
2. Pour l'estimation de l'exactitude des mesures on utilise les notions de l'erreur absolue, relative et réduite conventionnelle.
3. On distingue les erreurs de la mesure systématiques et aléatoires. Les erreurs systématiques changent régulièrement. Aux mesures répétées ils restent constantes et sont détectés seulement lors du contrôle de l'appareil. Les erreurs aléatoires sont détectés aux mesures répétées en forme de la dispersion des résultats.
4. Pour l'estimation de l'erreur des AMÉ on établit les classes de l'exactitude. Les AMÉ indicateurs ont 8 classes de l'exactitude. Le chiffre caractérisant la classe de l'exactitude, définit l'erreur maximale amenée de l'appareil exprimé en pourcentage.
5. Pour l'augmentation de la sensibilité on applique les schémas de mesure (de pont, de compensation etc.).
6. Pour l'augmentation des limites des significations mesurées du courant et de la tension on applique les shunts, les résistances supplémentaires, les transformateurs de mesure.
7. Pour la mesure des valeurs non électriques on utilise des divers capteurs (les convertisseurs primaires), qui transforment la mesure de la valeur contrôlée physique en changement du signal électrique (de la tension ou du courant).

## **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Expliquez, quelle est la différence entre la précision et la sensibilité de l'appareil de mesure ?
2. Expliquez qu'est-ce qu'on comprend par l'erreur de la mesure et quelles sont les erreurs des mesures ?
3. Expliquez, qu'est-ce que c'est l'erreur systématique et qu'est-ce que c'est l'erreur accidentée ? Par quelles méthodes on peut estimer leur présence et leur valeur ?
4. Expliquez, quel est le sens des erreurs absolues, relatives et réduite conventionnelle ? Pour quoi utilise-t-on ces notions ?
5. L'erreur réduite conventionnelle de l'appareil de mesure que représente-t-elle ?
6. Comment et quel est le but de distinguer les erreurs de mesure et les erreurs des instruments de mesure ?
7. Quelles sont les causes de l'erreur de l'outil de mesure ?



8. Comment et quel est le but d'élargissement des limites de la mesure des appareils de mesure du courant et de la tension dans les chaînes des courants continus et alternatifs ?

9. Comment on classifie les méthodes des mesures ? Que représentent les méthodes directes des mesures, et en quoi se caractérisent les méthodes indirectes ?

10. Quelles méthodes des mesures vous savez ? Expliquez l'essence de ces méthodes.

11. Qu'est-ce qui caractérise et qu'est-ce qui diffère les méthodes de l'estimation directe et les méthodes de la comparaison ?

12. Dans quel but pour les mesures on utilise les schémas de mesure et les convertisseurs de mesure ?

13. Comment on insère le wattmètre électrodynamique dans la chaîne monophasée (triphasee) lors de la mesure de la puissance active ?

14. Comment à l'aide du wattmètre mesurer la puissance réactive du réseau triphasé ?

15. Quelles sont les causes de haute précision de mesure lors de la méthode de compensation ?

16. Comment choisir un ampèremètre ou un voltmètre pour la réduction de l'erreur méthodique de la mesure du courant ou de la tension ?

17. Comment à l'aide de deux wattmètres mesurer au réseau électrique triphasé à trois fils les puissance active et réactive du récepteur ?

18. Avec quels convertisseurs primaires on utilise les ponts automatiques et les potentiomètres ?

19. Quelles sont les avantages des méthodes électriques de la mesure des valeurs non électriques ?

## Quatrième parti : TRANSFORMATEURS ET MACHINES ÉLECTRIQUES

---

Les transformateurs et les machines électriques sont des appareils dans lesquels s'effectue la conversion de l'énergie : dans les transformateurs – de l'énergie électrique d'une classe de tension ou de courant en une autre classe de tension ou de courant ; dans les machines électriques – de l'énergie mécanique en énergie électrique ou de l'énergie électrique en énergie mécanique.

**La machine électrique** est un dispositif électromécanique qui effectue la transformation mutuelle des énergies mécanique et électrique. Un dispositif qui convertisse de l'énergie mécanique en énergie électrique s'appelle un **générateur électrique** (un *générateur*) et un dispositif qui convertisse de l'énergie électrique en énergie mécanique s'appelle un **moteur électrique**. Un **transformateur** – c'est un dispositif de conversion d'énergie électrique sans pièces mobiles qui modifie les tensions et courants associés à une énergie électrique sans changement de fréquence.

La possibilité de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique pour la première fois a été établie par M. Faraday [62], qui a créé en 1821 le premier modèle de moteur électrique dans lequel le courant électrique, en passant par le fil de cuivre provoquait son mouvement autour d'un aimant statique installé verticalement. Cependant, les travaux sur la création d'un moteur électrique au courant de plus de la période décennale n'apportaient pas les résultats satisfaisants. Seulement en 1834, l'académicien russe B. S. Jacobi [63] a créé une construction, servant par le prototype du moteur moderne.

La possibilité de la création du générateur électrique est apparue seulement après la découverte de M. Faraday en 1831 de la loi de l'induction électromagnétique. En utilisant cette découverte, Hippolyte Pixii [64] en 1832 a créé la première génératrice électromagnétique avec les aimants permanents tournant et avec le commutateur pour le redressement du courant. D'abord le développement des électromoteurs et les générateurs allait indépendamment les uns des autres. En 1833 E. Lenz [65] a formulé le principe de la convertibilité des machines électriques, et en 1838 ce principe était pratiquement réalisé. La poursuite de la phase de développement des générateurs était le remplacement des aimants permanents par les électroaimants.

Début de la période de développement des machines électriques est liée principalement au courant continu. La raison en est que les consommateurs de l'énergie électrique étaient d'installation, travaillant exclusivement sur le courant continu (les lampes à arc, l'installation de la galvanoplastie, etc.). L'application de l'éclairage électrique dans les grandes villes a nécessité augmentation de la puissance des générateurs électriques et de leur développement.

En 1867 W. Siemens [66] a appliqué le principe de l'auto-excitation pour les générateurs de l'excitation série. La même année J. Maxwell a proposé pour la première fois la théorie mathématique de la machine électrique à l'auto-excitation, ayant mis les bases de la théorie des machines électriques.

En 1870, Z. Gramme [67] a construit une machine avec l'induit en anneau et en 1873 F. Hefner-Alteneck [61] et W. Siemens ont construit une machine avec l'induit en tambour.

Le développement des chemins de fer électriques a augmenté considérablement la demande pour moteurs et générateurs électriques, ce qui a contribué à leur perfectionnement ultérieur.

Dans les années 80 du XIX-eme siècle est apparue la nécessité de transmettre de l'énergie électrique à distance. En 1882, ont été effectuées des expériences sur le transport de l'électricité avec du courant continu sous haute tension. Toutefois, la haute tension dans les générateurs à courant continu a aggravé le travail du collecteur, ce qui amenait souvent aux accidents. Tout cela a renforcé l'intérêt d'électriciens de ce temps pour le courant alternatif. Un grand mérite dans le développement de la technique du courant alternatif appartient au savant russe P. N. Iablotchkov [68], qui largement utilisait le courant alternatif pour l'alimentation des bougies électriques dont il a inventées. En 1876 P. N. Iablotchkov a appliqué les transformateurs à cœur non fermé pour l'alimentation de ces bougies, mettant ainsi le début de la pratique de l'utilisation de transformateurs. Les transformateurs à noyau fermé, semblable aux transformateurs modernes, sont apparus plus tard, en 1884.

Le début de l'application pratique du courant alternatif pour les objectifs de commande électrique on peut considérer comme 1889, quand l'ingénieur russe M. O. Dolivo-Dobrovolsky [69] a proposé pour l'application pratique le système triphasé du courant alternatif et a construit un moteur asynchrone triphasé et un transformateur triphasé.

La première ligne de transport à courant alternatif triphasé longueur totale de 175 km sous une tension de 15 mille volts avec l'application de transformateurs triphasés a été construite par Dolivo-Dobrovolsky en 1891. Les résultats des essais de cette ligne ont confirmé la possibilité d'application d'un système triphasé pour le transport de quantités importantes d'électricité avec un rendement relativement haut.

Vers le début du XXe siècle ont été créés tous les principaux types de machines électriques et on a élaboré les bases de leur théorie. Depuis ce temps, il y a le rythme rapide d'électrification de l'industrie et des transports.

Actuellement, les transformateurs et les machines électriques s'appliquent presque à tous les secteurs de l'économie, en particulier aux entreprises de l'industrie de construction et aux chantiers de construction.

Dans ce tutoriel est choisie adoptée par de nombreux auteurs la séquence de l'exposition des thèmes de notre cours qui est déterminé par la logique de l'étude des processus physiques dans les équipements électriques : transformateurs (monophasés, triphasés), machines électriques (machines à courant continu, machines asynchrones, machines synchrones).

Pour comprendre le principe de fonctionnement des machines électriques la connaissance de la loi de l'induction électromagnétique (loi de Faraday) [70] et de la loi de l'interaction électromagnétique (loi de Biot-Savart-Laplace) [71] est nécessaire.

**La loi de l'induction électromagnétique** est formulé de la manière suivante : la valeur de la force électromotrice  $e$ , induite dans un circuit conducteur fermé, est proportionnelle à la vitesse de variation du flux magnétique  $\Phi$ , qui traverse ce circuit conducteur

$$e = \frac{-d\Phi}{dt}.$$

Le signe « - » exprime la loi de Lenz, selon laquelle le courant induit s'efforce toujours d'empêcher au changement du flux magnétique qui lui donne naissance.

Conformément à la loi de l'induction électromagnétique la f.é.m. dans le circuit est induite dans les cas suivants :

lors de la rotation d'un contour dans le champ magnétique immobile (machines à courant continu) ;

en cas d'un contour immobile et du champ magnétique tournant (machines synchrones) ;

lors de la rotation du champ magnétique et de la rotation du contour (machines asynchrones) ;

lorsque le champ magnétique et le contour sont immobiles dans l'espace, mais il y a la variation dans le temps de la valeur du champ magnétique (les transformateurs).

Le principe de fonctionnement du générateur est que lors de déplacement avec la vitesse  $V$  m/s d'un conducteur, dont la longueur est  $l$  m, perpendiculaire aux lignes magnétiques dans un champ magnétique dont l'induction est  $B$  T, dans ce conducteur conformément à la loi de l'induction électromagnétique se produit de la f.é.m.

$$e = B \cdot l \cdot V, \text{ V.}$$

Si on ferme les extrémités du conducteur à travers une résistance, ou de court-circuit, sous l'influence de la f.é.m. dans ce conducteur commence à circuler un courant  $I$ , A. Les sens de la f.é.m. et de courant sont identiques. Le courant  $I$ , en interaction avec le flux de champ magnétique, dans lequel il se trouve, crée la force, qui pousse le conducteur du champ magnétique et qui, en conformité avec la loi de l'interaction électromagnétique (loi de Biot-Savart-Laplace), est égale à

$$F = B \cdot I \cdot l, \text{ H.}$$

La force de l'interaction se manifeste comme la réaction à une force extérieure mise au conducteur. Elle est égale et opposée à la dernière.

Le principe de fonctionnement d'un moteur est que lors du passage de courant sur le conducteur placé dans un champ magnétique, le conducteur est influencé par la force  $F$ , sous l'action de laquelle il se déplacera.

## Chapitre 9 : TRANSFORMATEURS

**Notions clés :** transformateur,  $m$  ; autotransformateur,  $m$  ; transformateur élévateur (abaisseur),  $m$  ; transformateur de mesure,  $m$  ; enroulement primaire (secondaire),  $m$  ; noyau magnétique,  $m$  ; régime de court-circuit (de la marche à vide),  $m$  ; rapport de transformation,  $m$ .

### 9.1 Informations de base sur les transformateurs

Un **transformateur** c'est un appareil électrotechnique destiné à la transformation du courant alternatif d'une tension au courant alternatif d'une autre tension de la même fréquence.

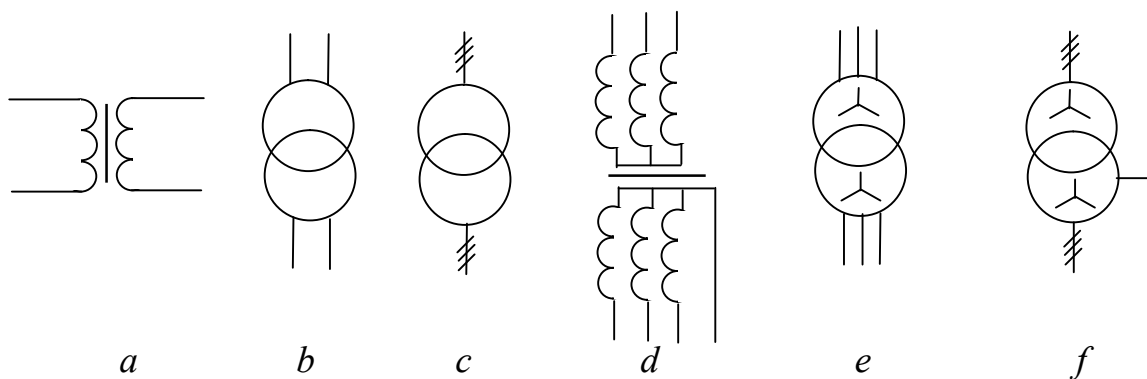
Un transformateur est constitué d'un noyau en acier et des enroulements. Le noyau est formé des feuilles fines de l'acier électrotechnique isolées l'un de l'autre en vue de la réduction des pertes de puissance sur l'hysteresis et les courants de Foucault.

La conversion de tension dans les transformateurs se réalise par le flux magnétique variable des enroulements qui sont inductivement liés entre eux. L'**enroulement** connecté à la source d'énergie électrique est appelé **primaire** et l'**enroulement** connecté à la charge – **secondaire**. Tous les paramètres du transformateur relatives à l'enroulement primaire (nombre de spires, tension, courant, etc.) sont appelés primaires et dans leurs notations littérales on utilise l'indice 1. En conséquence les paramètres de l'enroulement secondaire sont appelés secondaires et s'inscrivent avec l'indice 2.

S'il est nécessaire de réaliser une alimentation de deux ou plus de charges dont les tensions d'alimentation sont différents, on fait plusieurs enroulements secondaires.

On distingue les transformateurs de puissance et les transformateurs de la destination spéciale (de soudure, de mesure, d'adaptation et d'autres).

Les transformateurs de puissance peuvent être monophasés (pour les chaînes du courant monophasé) et triphasés (pour les chaînes triphasées), les transformateurs élévateurs et abaisseurs. La figure 9.1 montre les symboles graphiques des transformateurs monophasés (*a*, *b*) et triphasés (*c*, *d*, *e*, *f*).



**Figure 9.1** – Symboles graphiques des transformateurs

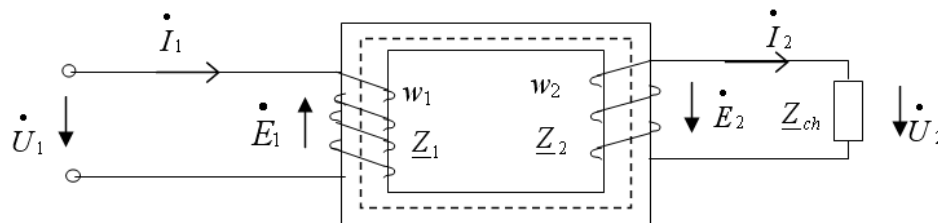
Par le procédé de refroidissement les transformateurs sont divisés en transformateurs secs et transformateurs dans l'huile. Les enroulements des transformateurs dans l'huile sont plongés dans un réservoir en acier rempli d'huile.

La plaque signalétique d'un transformateur indique ses paramètres nominaux : tension primaire et secondaire ; puissance apparente nominale ; courant nominal à puissance apparente nominale ; fréquence ; nombre de phases ; schéma de connexion des bobinages ; mode de fonctionnement (continu ou de courte durée) ; moyen de refroidissement.

## 9.2 Transformateur monophasé

### 9.2.1 Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé.

Dans le cas le plus simple sur noyau magnétique de transformateur monophasé (fig. 9.2) sont disposés deux enroulements en cuivre isolé. À l'enroulement primaire est amené tension d'alimentation  $U_1$ . L'enroulement secondaire, dont la tension est  $U_2$ , est connecté au consommateur d'énergie électrique  $Z_{ch}$ .



**Figure 9.2** – Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé

Le courant alternatif  $\dot{I}_1$ , en passant par les spires du bobinage primaire du transformateur  $w_1$ , crée dans le noyau magnétique le flux magnétique variable de  $\Phi$ . Ce flux, dont la valeur change dans le temps d'après la loi sinusoïdale  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , pénètre les spires du bobinage secondaire du transformateur. En ce cas conformément à la loi de l'induction électromagnétique dans le bobinage secondeure est induit la f.é.m.  $\dot{E}_2$  :

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (9.1)$$

où :

$w_2$  – nombre des spires du bobinage secondaire du transformateur ;

$E_{m2}$  – amplitude de la valeur de f.é.m. dans le bobinage secondaire.

Sous l'effet de la f.é.m.  $e_2$  dans la chaîne secondaire du transformateur, fermé sur la charge, passe le courant  $\dot{I}_2$ .

La relation de la f.é.m. du bobinage primaire du transformateur à la f.é.m. de son bobinage secondaire, égal à la relation du nombre des spires des bobinages correspondants est appelée le **rapport de transformation** du transformateur

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.2)$$

Si  $E_1 < E_2$ , le transformateur est dit élévateur de tension et si  $E_1 > E_2$  le transformateur est dit abaisseur de tension.

**9.2.2 Régimes de fonctionnement d'un transformateur.** En fonction de la valeur de l'impédance de la charge on distingue trois régimes de fonctionnement du transformateur:  $Z_{ch} = \infty$  – fonctionnement à vide;  $0 < Z_{ch} < \infty$  – fonctionnement en charge;  $Z_{ch} = 0$  – régime de court-circuit.

**En régime de la marche à vide** on ne branche aucune charge au bobinage secondaire. Le courant du bobinage primaire du transformateur en cas de consommateur déconnecté de l'énergie électrique est le **courant de la marche à vide**  $I_0$

$$I_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \alpha) .$$

Dans cette équation, l'angle de pertes magnétiques  $\alpha$  (angle de déphasage entre le courant et de flux magnétique d'un transformateur) est conditionné par les pertes de la puissance dans le circuit magnétique du transformateur. La valeur de l'angle  $\alpha$  pour les aciers électriques moderne est généralement faible et est de l'ordre de 4 à 6°.

La tension, connecté au transformateur à vide, conformément à la deuxième loi de Kirchhoff peut être représenté comme une somme des chutes de tension dans le circuit primaire

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_0 + jX_1 \dot{I}_0 , \quad (9.3)$$

où :

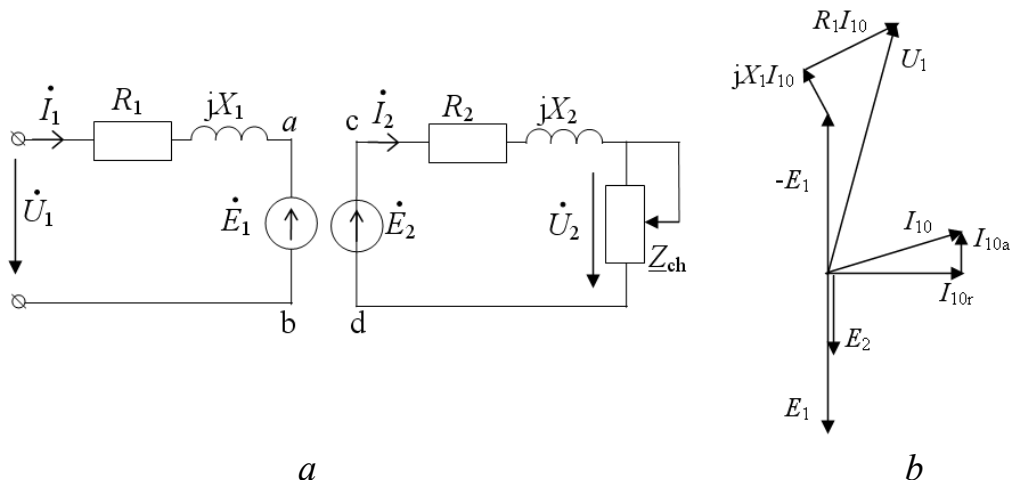
$R_1$  – résistance active du bobinage primaire ;

$X_1$  – résistance réactive du bobinage primaire ;

$E_1$  – f.é.m., induit dans le bobinage primaire par le flux de force magnétique

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) .$$

À partir de l'équation de l'équilibre électrique (9.3), on peut construire le diagramme vectoriel de transformateur pour le régime de la marche à vide (fig. 9.3, b).



**Figure 9.3** – Schéma de substitution (a) et diagramme vectoriel (b) de régime à vide

En raison de la remagnétisation du noyau magnétique dans lui apparaissent les pertes de puissance, qui s'appellent les pertes de la marche à vide. La puissance  $P_0$ , consommée du réseau en régime à vide, se dépense principalement à couvrir les pertes dans le circuit magnétique, de sorte que les pertes de l'enroulement sont petites. Le courant de la marche à vide  $I_{10}$  contient les composantes active et réactive  $I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}$ .

Le **régime de court-circuit** pour le transformateur de puissance est d'avarie. Cependant, certains transformateurs spéciaux sont calculés pour un fonctionnement en régime proche du court-circuit. Ce sont les transformateurs de soudure, les transformateurs de mesure de courant.

Lors de l'utilisation d'un transformateur en **mode de charge** ( $Z_{ch} \neq 0$ ) dans le circuit secondaire sous l'influence de  $\dot{E}_2$  apparaît le courant  $\dot{I}_2$ . Le flux magnétique principal  $\Phi_0$  est créé par l'action commune de la force magnétomotrice des bobinages primaires et secondaires. La force résultante magnétomotrice  $F_{result}$  est égale à leur somme géométrique

$$\dot{F}_{result} = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_{10} . \quad (9.4)$$

En tenant compte de la résistance active des bobinages les équations de l'état électrique des chaînes primaires et secondaires ont l'air :

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_1, \\ \dot{E}_2 &= (R_2 + jX_2)\dot{I}_2 + \underline{Z}_{ch}\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (9.5)$$

**9.2.3 Les schémas équivalents du transformateur.** Pour l'étude des modes de fonctionnement des transformateurs il est rationnellement de remplacer le lien magnétique entre les bobinages primaires et secondaires par le lien électrique. La connexion de point  $a$  avec point  $c$  et de point  $b$  avec point  $d$  sur le schéma de la figure 9.3,  $a$  est possible, si  $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{cd}$ . À cette exigence satisfait la condition

$$\dot{E}'_2 = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{w_1}{w_2},$$

ou  $\dot{E}'_2$  s'appelle la F.E.M. réduite.

L'équivalence des rapports énergétiques dans le transformateur et son schéma équivalent ne seront pas violés, si la puissance apparente  $S_2 = S'_2$  ( $E_2 I_2 = E'_2 I'_2$ ), la puissance active  $P_2 = P'_2$  ( $R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2$ ) et la puissance réactive  $Q_2 = Q'_2$  ( $X_2 I_2^2 = X'_2 I'^2_2$ ), ainsi que la puissance dans la charge resteront inchangés. À partir des dernières égalités nous recevrons pour le schéma équivalent les significations de ses paramètres, qui s'appellent réduites (vers le nombre des spires  $w_1$ )

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{n}; \quad R'_2 = R_2 n^2; \quad X'_2 = X_2 n^2; \quad U'_2 = U_2 n; \quad Z'_2 = Z_2 n^2. \quad (9.6)$$

Ainsi, le schéma de transformateur (fig. 9.3,  $a$ ) peut être représenté en forme du schéma de substitution, montré sur la figure 9.4,  $a$ . Le système

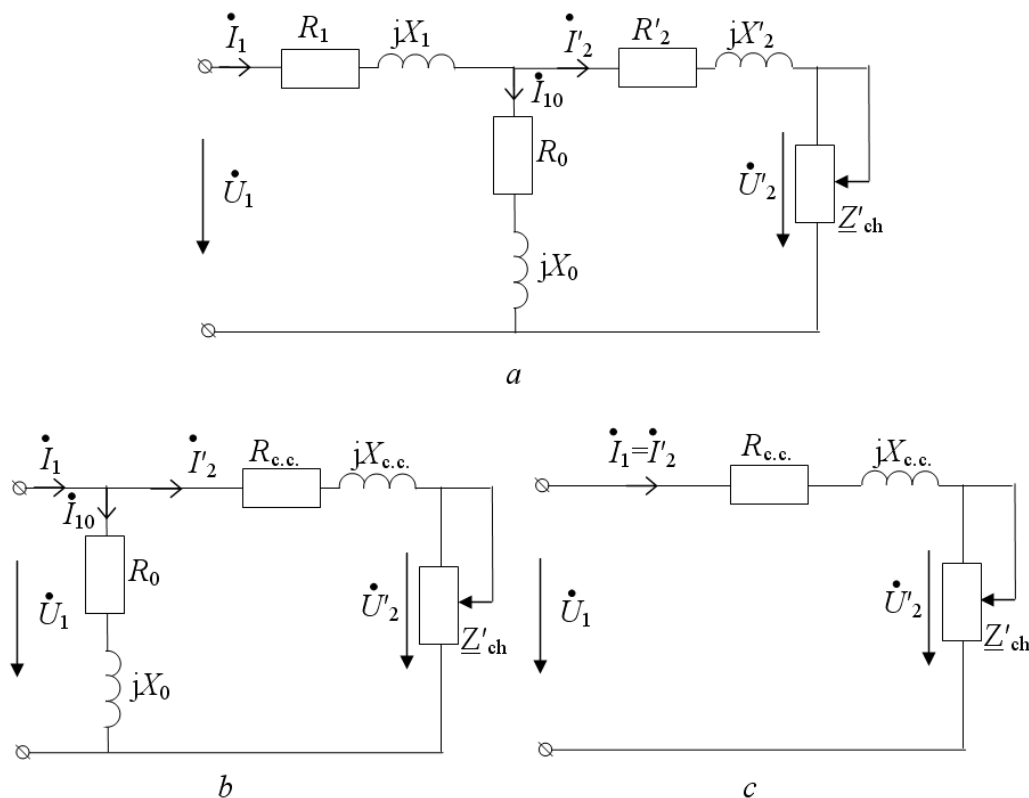


complet des équations d'état électrique et magnétique du transformateur en tenant compte de la réduction du bobinage secondaire vers primaire selon le nombre de spires et  $\dot{U} = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$  a la forme suivante :

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U} + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U} &= \underline{Z}'_2 \dot{I}_2' + \dot{U}_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \dot{I}_2'.\end{aligned}\quad (9.7)$$

Ces équations décrivent les procès électromagnétiques dans le schéma à deux boucles, qu'on appelle le schéma équivalent du transformateur. La figure 9.4, *a* présente le schéma équivalent en T du transformateur. Dans les cas où  $\underline{Z}_1 \dot{I}_1$  est faible par rapport à  $\dot{U}_1$  on croit que  $U_1 \approx U$  et le schéma équivalent peut être simplifié (fig. 9.4, *b*). Un tel schéma s'appelle le schéma de substitution en  $\Gamma$ . Ici  $X_{c.c.} = X_1 + X'_2$ ;  $R_{c.c.} = R_1 + R'_2$ .

Dans les modes de fonctionnement d'un transformateur proches de court-circuit, quand  $I_{10} \ll I_1$ , on exclut du schéma de la figure 9.4, *b* la branche  $R_0 - jX_0$  (voir la figure 9.4, *c*).



**Figure 9.4** – Schémas de substitution du transformateur monophasé :  
*a* – en T ; *b* – en  $\Gamma$  ; *c* – du régime de court-circuit

Les schémas équivalents du transformateur sont utilisés pour l'analyse et les calculs de ses régimes de fonctionnement, c'est pourquoi on les appelle les schémas équivalents de calcul du transformateur.

## 9.3 Paramètres de passeport et caractéristique extérieure du transformateur

**9.3.1 Paramètres de base.** Dans le processus de conversion de la tension dans un transformateur on rencontre les pertes de l'énergie électrique dans les enroulements et circuits magnétiques, dus au réchauffement. Plus le courant de charge et la tension de la source, plus se réchauffent plus fortement les bobinages et le noyau magnétique du transformateur. Un surchauffage de longue durée des bobinages peut provoquer le vieillissement et la destruction de l'isolation, le court-circuit entre les spires et la panne du transformateur. Par conséquent, pour assurer la durée de fonctionnement du transformateur de puissance en charge l'usine du fabricant donne les paramètres du transformateur qu'on appelle les données du passeport : puissance apparente  $S$  ; coefficient (rapport) de transformation  $n$  ; les tensions nominales  $U_{1nom}$  et  $U_{2nom}$  ; tension de court-circuit  $U_{c-c}$  ; les courants nominaux  $I_{1nom}$  et  $I_{2nom}$  ; courant à vide  $I_{10}$  ; fréquence nominale  $f_{nom}$  ; mode de fonctionnement (de longue durée ou de courte durée), pertes fer (de l'acier magnétique)  $\Delta P_0$  et pertes cuivre (d'enroulements)  $\Delta P_{cuivre}$  et al.

En train de l'exploitation de longue durée, en particulier lors des surcharges du courant, des fluctuations de la tension et de la fréquence, de l'humidité et de la température augmentées, les propriétés d'isolation s'aggravent, ce qui augmente les pertes d'énergie. Il est donc nécessaire de vérifier périodiquement les paramètres de base de transformateur, notamment  $U_{c-c}$  et  $I_{10}$ , qui caractérisent les pertes d'énergie dans les enroulements, l'isolation et l'acier magnétique.

Pour cet objectif on fait deux essais : l'essai à vide et l'essai en court-circuit. En vertu de ces essais on définit aussi les paramètres des schémas de substitution.

**9.3.2 Essai à vide.** Le schéma de branchement des appareils de mesure lors d'essai à vide est présenté sur la figure 9.5, *a*. En train de l'expérience on mesure :  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_{10}$ ,  $P_0$  lors de la modification  $U_1$  de 0 à  $U_{1nom}$ . Lors  $U_1 = U_{1nom}$  on définit : pertes de l'acier magnétique, coefficient de transformation  $n = U_1/U_2$ , courant à vide  $I_{10}$ .

Les données reçues permettent de calculer les paramètres du schéma de substitution :

$$R_0 = \frac{\Delta P_{0nom}}{I_{10nom}^2}; \quad Z_0 = \frac{U_{1nom}}{I_{10nom}}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad \cos \varphi_{0nom} = \frac{\Delta P_{0nom}}{I_{10nom} U_{1nom}}. \quad (9.8)$$

Lors du calcul, on suppose que les pertes dans les enroulements sont pas grandes, puisque  $I_{10nom}$  fait 5–10% de  $I_{1nom}$ .

**9.3.3 Essai en court-circuit.** Lors d'essai en court-circuit (fig. 9.5, *b*) l'enroulement secondaire du transformateur est de court-circuit, et l'enroulement primaire est activé par le régulateur de tension RT sur telle tension baisée à qui dans les enroulements du transformateur passent les courants nominaux. Cette

tension est appelée la **tension de court-circuit**. Dans l'essai on mesure  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1 = U_{c-c}$  et  $P_2$  au changement du courant  $I_1$  de 0 à  $I_{1.nom}$ . À  $I_1 = I_{1.nom}$  on détermine les pertes du court-circuit, la tension de court-circuit  $U_{c-c.nom}$ .

D'après les données d'essai de court-circuit on calcule les paramètres du schéma de substitution :

$$\begin{aligned} R_{c-c} &= \frac{\Delta P_{c-c.nom}}{I_{1.nom}^2}; & Z_{c.c.} &= \frac{U_{c-c.nom}}{I_{1.nom}}; \\ X_{c-c} &= \sqrt{Z_{c-c}^2 - R_{c-c}^2}; & \cos \varphi_{c-c} &= \frac{R_{c-c}}{Z_{c-c}}; \end{aligned} \quad (9.9)$$

où  $R_{c-c} = R_1 + R_2'$  et  $X_{c-c} = X_1 + X_2'$  sont les résistances actives et inductives du court-circuit du transformateur.

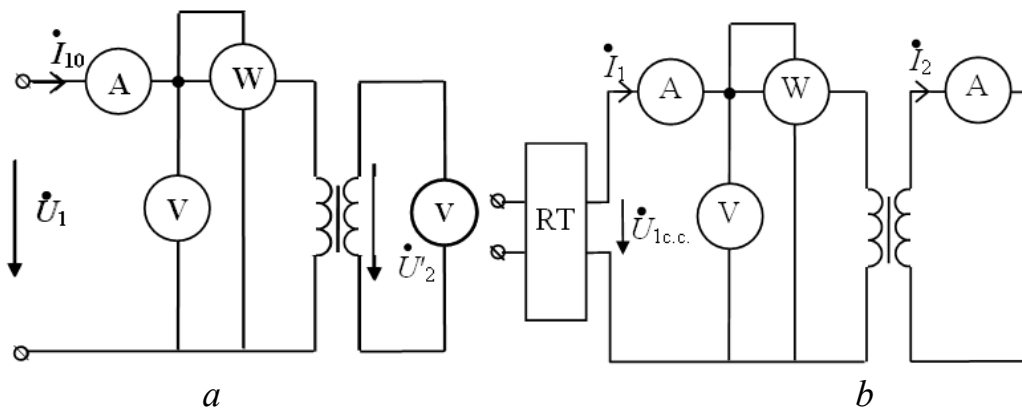


Figure 9.5 – Schemas d'essais à vide (a) et en court-circuit (b)

Lors du calcul on suppose que lors de très basse tension le flux du champ magnétique et le courant aimantant sont petits, c'est-à-dire  $I_{10} \approx 0$ . Alors on peut considérer que les forces magnétomotrices des bobinages primaires et secondaires du transformateur sont égales

$$w_1 I_1 = w_2 I_2 \text{ ou } I_1 = I_2' \quad (9.10)$$

et, par conséquent, le wattmètre mesure seulement les pertes de puissance dans les enroulements.

La tension de court-circuit et ses composantes active et réactive sont exprimées généralement en pourcentage :

$$U_{c-c\%} = \frac{U_{c-c.nom}}{U_{1.nom}} 100\% . \quad (9.11)$$

La valeur de  $U_{c-c}$  permet de calculer le courant de court-circuit  $I_{c-c}$  en cas du régime d'avarie :

$$I_{1.c-c} = \frac{U_{1.nom}}{Z_{c-c}} = I_{1.nom} \frac{U_{1.nom}}{U_{c-c.nom}} = I_{1.nom} \frac{100}{U_{c-c\%}} . \quad (9.12)$$

**9.3.4 Caractéristique extérieure du transformateur.** Les propriétés fonctionnelles du transformateur se caractérisent par la dépendance de la tension sur la charge  $U_2$  et le rendement  $\eta$  du courant  $I_2$ .

La dépendance  $U_2(I_2)$  en fonction de la nature de la charge (active, réactive, capacitif) est appelé **caractéristique l'extérieur du transformateur**.

On peut obtenir la caractéristique l'extérieur du transformateur et la dépendance  $\eta(I_2)$  par l'expérience ou par calcul à partir du schéma de substitution. Dans ce dernier cas, l'équation de l'état électrique, obtenu à partir du schéma de substitution en  $\Gamma$  (voir la figure 9.4, b), peut s'écrire

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - (R_{c-c} + jX_{c-c})\dot{I}'_2 . \quad (9.13)$$

Le caractère de dépendance  $U_2(I_2)$  est défini par le caractère de la charge. Ainsi, au caractère capacitif de la charge ( $\cos \varphi < 0$ ) avec la croissance du courant  $I_2$  la tension  $U_2$  augmente, et au caractère inductif ( $\cos \varphi > 0$ ) – tombe (voir la figure 9.6).

Le rendement du transformateur  $\eta$  est égal à la relation de puissance utile active  $P_2$  à toute la puissance active entrant du réseau :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{fer}} + \Delta P_{\text{cuivre}}} , \quad (9.14)$$

où :

$\Delta P_{\text{fer}}$  – pertes « fer » ;

$\Delta P_{\text{cuivre}}$  – pertes « cuivre ».

Puissance utile du transformateur à n'importe quel caractère de la charge

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_{\text{nom}} \cos \varphi_2 , \quad (9.15)$$

où :

$S_{\text{nom}}$  – puissance apparente nominale du transformateur, VA ;

$\beta = I_2/I_{2\text{nom}}$  – coefficient de charge.

Les pertes dans l'acier  $\Delta P_{\text{fer}}$  ne dépendent pas de la charge et sont égaux aux pertes de la marche à vide. Les pertes dans les bobinages  $\Delta P_{\text{cuivre}}$  sont proportionnelles au carré du courant

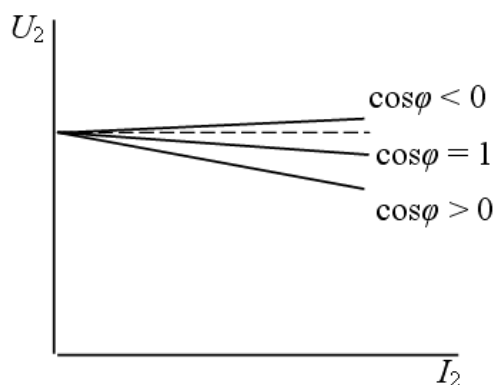
$$\Delta P_{c-c} = R_{c-c} I_2^2 = R_{c-c} I_{\text{nom}}^2 \beta^2 = \Delta P_{\text{cuivre.nom}} \beta^2 ,$$

où  $R_{c-c}$  – résistance active du bobinage.

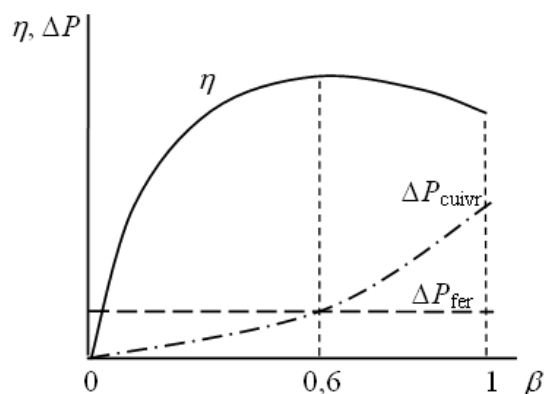
Après la substitution dans l'expression pour les rendements on aura

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{fer}} + \Delta P_{\text{cuivre}} \beta^2} . \quad (9.16)$$

Les dépendances  $\Delta P_{\text{cuivre}}$ ,  $\Delta P_{\text{fer}}$  et  $\eta$  du coefficient de la charge  $\beta$  sont présentées sur la figure 9.7. La dépendance  $\eta(\beta)$  a le maximum. Au moyen de la sélection des paramètres des bobinages et du magnétique pour les transformateurs de puissance on choisisse  $\eta_{\text{max}}$  à  $\beta = 0,6-0,7$ .



**Figure 9.6** – Dépendance  $U_2(I_2)$  en fonction de la nature de la charge

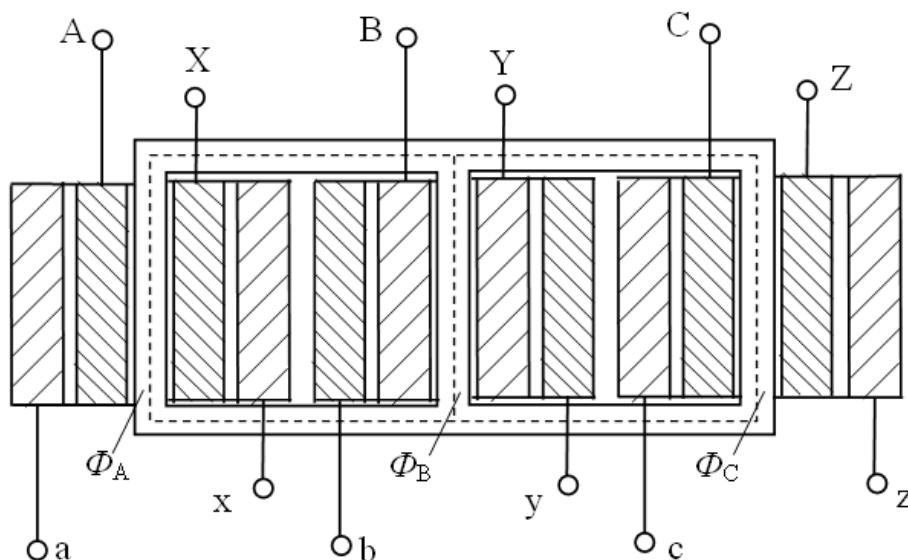


**Figure 9.7** – Dépendances  $\Delta P_{\text{cuivre}}$ ,  $\Delta P_{\text{fer}}$  et  $\eta$  en fonction du coefficient de la charge  $\beta$

## 9.4 Transformateurs triphasé

Pour les transformateurs triphasés les schémas équivalents sont représentés pour une phase de même que pour les transformateurs monophasés. On définit les paramètres du schéma de substitution à partir des essais à vide et en court-circuit.

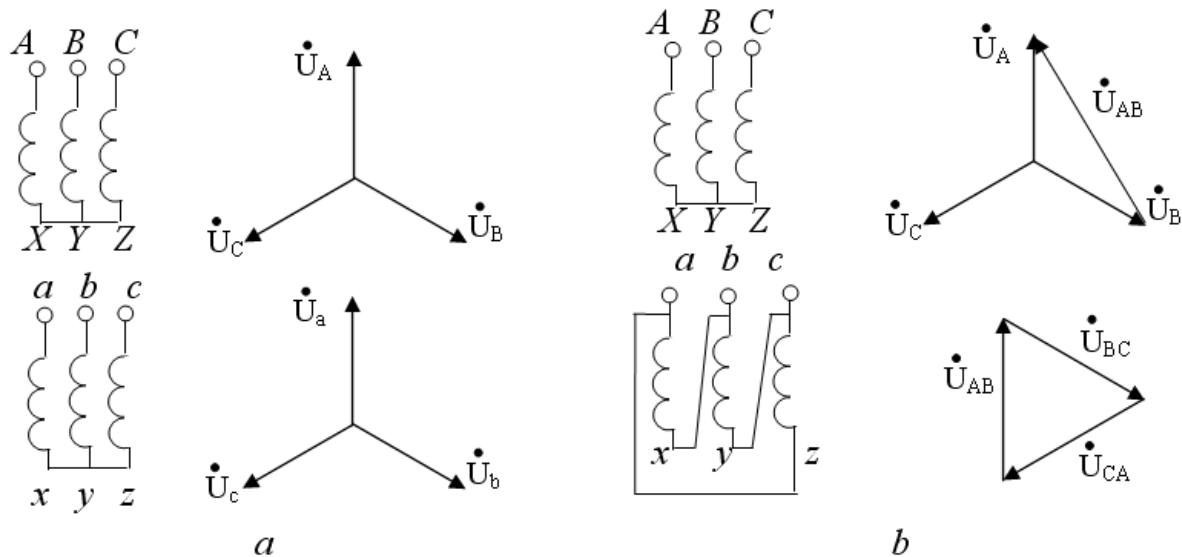
De manière constructive transformateur triphasé on effectue avec un noyau en forme de barres (fig. 9.8). Sur chacune des trois barres on place les bobinages primaire et secondaire d'une phase. Les forces magnétomotrices résultantes de chaque phase sont décalées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres et la somme de vecteurs de flux magnétique est égale à zéro ( $\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$ ). Les phases des bobinages primaires et secondaires peuvent être connectés en étoile (Y) et/ou en triangle ( $\Delta$ ). Par conséquent, les vecteurs des tensions linéaires  $\dot{U}_1$  et  $\dot{U}_2$  peuvent ne pas correspondre à la phase.



**Figure 9.8** – Construction d'un transformateur triphasé

Décalage de phase est indiquée par un groupe de connexion des bobinages. Ainsi, par exemple, le schéma (voir la figure 9.9, a) montre un groupe de

connexion Y/Y–0, où 0 indique la coïncidence de phase secondaire A à la phase primaire A. La figure 9.9, *b* illustre le schéma de connexion de Y/Δ–11, ici 11 indique que le vecteur tension de l'enroulement primaire  $\dot{U}_{AB}$  est en avance de phase de l'enroulement secondaire à  $30^\circ$  et coïncide avec la position des aiguilles d'une montre sur le chiffre 11.



**Figure 9.9** – Schémas de la connexion des enroulements des transformateurs triphasés

## 9.5 Autotransformateurs

La conversion de la tension alternative peut être effectuée en utilisant autotransformateur. La construction d'un autotransformateur est semblable à la construction d'un transformateur ordinaire ; elle a un acier magnétique fermé, sur lequel se trouvent les deux enroulements, fabriqués à partir de fil de cuivre de différentes sections. À la différence de transformateur les enroulement autotransformateur sont connectés électriquement.

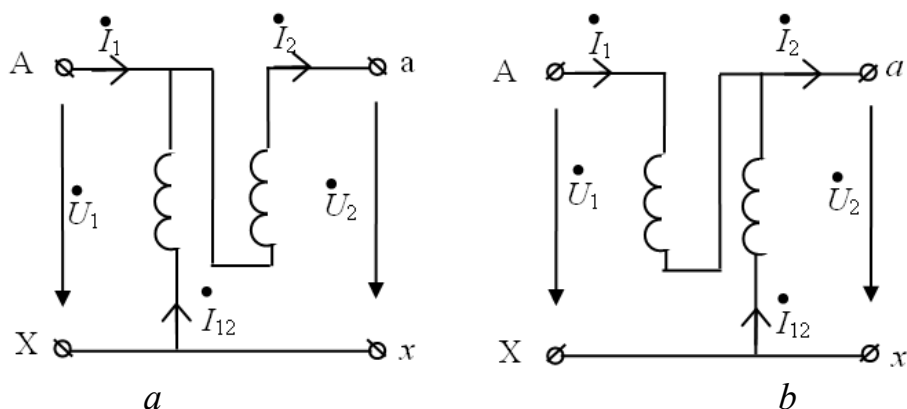
L'autotransformateur abaisseur a le bobinage secondaire qui fait la partie du bobinage de la tension primaire. Et dans l'autotransformateur élévateur de tension, au contraire, le bobinage de la tension primaire fait la partie du bobinage de la tension secondaire. Ainsi, dans l'autotransformateur excepté le lien magnétique entre les bobinages primaires et secondaires il y a un lien électrique.

Les schémas électriques des autotransformateurs abaisseur et élévateur, sont présentés sur la figure 9.10. La tension de la source appliquée aux bornes du bobinage primaire AX, dont nombre des spires  $w_1$ , est équilibré pour l'essentiel par F.E.M.  $E_1$ , créé par le flux de force magnétique variable dans le circuit magnétique. Le bobinage secondaire a le nombre des spires  $w_2$  et elle crée une force électromotrice  $E_2 = E_1 \cdot (w_1/w_2)$ .

Le facteur de transformation est le rapport entre les tensions primaire et secondaire :

$$n = U_1/U_2 = w_1/w_2 . \quad (9.17)$$

Lorsque on connecte aux bornes  $ax$  une charge  $Z_{ch}$  le courant dans la partie commune des bobines  $ax$   $I_{12}$  sera égal à la somme géométrique des courants des chaînes primaire et secondaire  $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ .



**Figure 9.10** – Schémas des autotransformateurs :  
*a* – élévateur ; *b* – abaisseur

La puissance, consommée par autotransformateur du réseau, sans tenir compte des pertes, sera égale à la puissance consommée par la charge, i.e.  $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ , d'où il suit que  $I_1/I_2 = U_1/U_2 = n$ . De plus de la même façon que dans le transformateur ordinaire, le flux de force magnétique principal  $\Phi_{0m}$  reste la même à la tension invariable  $\dot{U}_1$ .

Si on néglige de courant à vide, alors on peut supposer que les courants  $I_1$  et  $I_2$  sont en déphasage à  $180^\circ$  et que leurs somme géométrique est égale à la somme algébrique, i.e.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 [(1 - (1/n))] . \quad (9.18)$$

Les procès électromagnétiques dans un autotransformateur ne se distinguent pas par rien des procès dans un transformateur ordinaire. L'avantage de l'autotransformateur devant le transformateur est la structure plus simple, moins de dépense du cuivre, le plus haut rendement, moins de pertes dans les bobinages et l'acier magnétique. Cela s'explique par le fait que dans l'autotransformateur l'énergie du réseau primaire à secondaire est transmise partiellement par une connexion électrique.

Cependant l'autotransformateur en comparaison du transformateur a beaucoup de désavantages importantes. Il a une petite résistance du court-circuit ce qui conduit à un grand courant du court-circuit, et la liaison électrique entre les bobinages à haute tension primaire est dangereux à l'attouchement d'une personne vers les fils dans le circuit de charge.

Les procès électromagnétiques dans l'autotransformateur triphasé sont les mêmes que dans l'autotransformateur monophasé. Les autotransformateurs triphasés s'appliquent en génie électrique pour la communication des réseaux mixtes de tension, par exemple 110 et 220 kV, 220 et 500 kV, etc., lors de la mise en marche des électromoteurs asynchrones triphasés afin de réduire les courants de mise en marche.

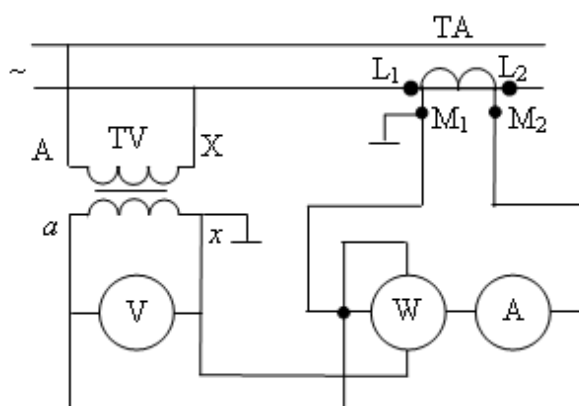
Autotransformateurs de la basse tension sont effectuées sur une petite puissance (jusqu'à 7,5 kVA). Ils ont, généralement, le bobinage avec une section

de fil et peuvent être utilisés comme pour l'augmentation, ainsi que pour l'abaissement de la tension.

Dans les laboratoires, on applique largement les autotransformateurs variables de basse tension de faible puissance, ayant une régulation de la tension de sortie. Ces autotransformateurs ont un seul enroulement sur un noyau magnétique toroïdale et une pince de charge mobile qui est réalisé sous la forme du contact mobile (glissant).

## 9.6 Transformateurs de mesure

Les transformateurs de mesure s'appliquent pour les mesures des tensions et des courants. Les transformateurs de mesure de tension sont utilisés pour l'insertion des voltmètres, des fréquencesmètres, des bobinages de la tension des wattmètres et des compteurs. Les transformateurs de mesure du courant sont destinés à la connexion des ampèremètres, des relais, des bobinages du courant des wattmètres et des compteurs.



**Figure 9.11** – Schéma de l'insertion des transformateurs de tension et du courant

La figure 9.11 montre le schéma de l'insertion des instruments de mesure à l'aide des transformateurs de mesure en réseau monophasé.

Pour la sécurité de toucher les instruments d'une pince à enroulements secondaires des transformateurs on mette à la terre. La tension mesurée  $U_1$  sur l'indication du voltmètre sera  $U_1 = n_U \cdot U_2$ , et le courant mesuré  $I_1$  – selon le l'indication de l'ampèremètre  $I_1 = n_I \cdot I_2$ , où  $n_U$  et  $n_I$  – coefficients de

transformation des transformateurs de tension et de courant, respectivement.

Bobinages secondaires ont des valeurs de  $U_2$  et  $I_2$ : 100 V pour les transformateurs de tension et de 5 A et 1 A pour les transformateurs de courant. Par conséquent, la gamme de la mesure peut être élargie grâce à la gestion des coefficients de transformation, i.e. les rapports du nombre de spires.

Le transformateur de mesure de tension fonctionne en régime proche de la marche à vide. Évidemment, l'exactitude de la mesure de la tension sera plus élevée, moins la chute de tension sur le transformateur. En effet, du schéma de substitution (voir la figure 9.4), il suit que l'erreur

$$\delta_U = \frac{U_2 w_2 / w_1 - U_1}{U_1} 100$$

est d'autant moins que moins sont  $R_{c-c}$  et  $X_{c-c}$ , ce qui est réalisé par la réduction du nombre des spires lors de l'augmentation de la section d'acier magnétique.

Dans les transformateurs de courant, au contraire, une diminution de l'erreur est obtenue par voie de la réduction du courant  $I_{10}$ , à quoi sert un noyau magnétique



annulaire en ruban en matériau à faible perte (faible valeur de la force coercive) et par le travail dans la partie insaturée de la courbe de magnétisation.

Car le mode normal de fonctionnement d'un transformateur de courant est le mode de court circuit, pour les commutations dans la chaîne secondaire on établit les adaptations fermant les bornes de sortie du bobinage secondaire.

### **Conclusions principales**

1. Transformateur convertit le courant alternatif d'une tension à courant alternatif de l'autre tension de la même fréquence.

2. Il y a trois modes de fonctionnement du transformateur : la marche à vide, en charge et en court-circuit.

3. L'analyse et le calcul des modes de fonctionnement du transformateur sont réalisés à l'aide des schémas équivalents.

4. Le schéma équivalent d'un transformateur triphasé est le même que le schéma équivalent d'un transformateur monophasé.

5. La construction d'un autotransformateur est semblable à la construction d'un transformateur ordinaire, mais ses enroulements sont connectés électriquement.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Quel est la destination et le principe de fonctionnement d'un transformateur ?

2. Pourquoi le noyau magnétique du transformateur est accompli de l'acier électrotechnique et pas de l'acier ordinaire, et se réunit des feuilles fines séparées, isolées l'un de l'autre ?

3. Comment on dispose les enroulements du transformateur à noyau magnétique ?

4. Qu'on appelle le coefficient de transformation du transformateur et comment le définir ?

5. À quoi sert-il le schéma de substitution d'un transformateur ?

6. Quel est le but des essais à vide et en court-circuit du transformateur ?

7. Expliquer la physique de la perte de puissance à vide du transformateur.

8. Quels sont les paramètres du transformateur appelé les paramètres de passeport ?

9. Comment on obtient une caractéristique externe du transformateur et de quoi elle dépend ?

10. Comparez les diagrammes vectoriels des schémas de substitution d'un transformateur en T et en  $\Gamma$  et composez les équations de l'état électrique de ces schémas.

11. Comment on connecte les bobinages des transformateurs triphasés ?

12. Quels sont les avantages et les inconvénients des autotransformateurs en comparaison des transformateurs ?

## Chapitre 10 : MACHINES À COURANT CONTINU

**Notions clés :** neutre géométrique (physique magnétique),  $m$  ; réaction d'induit,  $f$  ; processus de commutation,  $m$  ; feu circulaire du collecteur,  $m$  ; pôles auxiliaires,  $m\ pl$  ; bobinage de compensation,  $m$  ; paramètres nominaux,  $m\ pl$  ; caractéristique à vide (extérieur, de vitesse, mécanique),  $f$ .

La nécessité de l'utilisation des machines à courant continu (MCC) en tant que des générateurs ou des moteurs dans tels secteurs que l'électrochimie, la traction électrique, les appareils de levage, la commande électrique avec un large éventail de régulation de la vitesse est conditionnée par une série de leurs particularités. Dans l'industrie de la construction les machines à courant continu sont utilisés dans les installations de soudage électrique, dans la commande électrique des grues à tour et al.

### 10.1 Constitution de la machine à courant continu

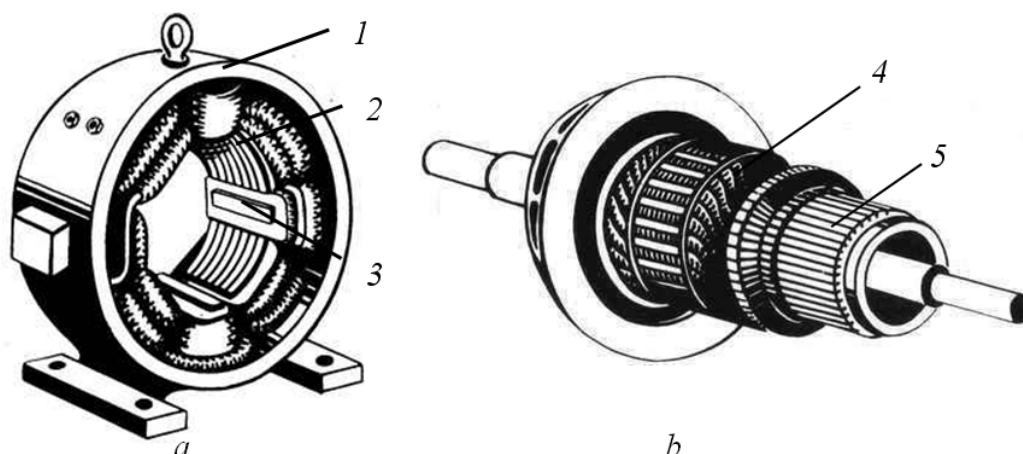
Structurellement les générateurs et les moteurs à courant continu sont réalisées de la même façon et se composent de **deux parties principales** : de **l'inducteur** (un électro-aimant immobile), créant le champ magnétique principal de la machine, et **l'induit (l'ancre)** tournant, dont le bobinage transforme l'énergie mécanique à l'électricité (générateur) ou l'énergie électrique à l'énergie mécanique (moteur).

L'inducteur immobile est constitué (fig. 10.1,) d'une culasse en acier coulé 1, des pôles principaux 3 et supplémentaires 2. Sur les pôles principaux s'installent les bobinages d'excitation auxquels on amène le courant continu, créant dans la chaîne magnétique de la machine le champ magnétique principal (le pôle – l'entrefer – l'ancre – l'entrefer – le pôle – la culasse – le pôle).

Les principaux pôles sont formés de tôles d'acier électrique de 0,5 mm d'épaisseur pour la réduction des pertes par courants de Foucault, résultant de l'ondulation du champ magnétique lors de la rotation de l'induit.

Les pôles supplémentaires on accomplisse généralement à partir d'acier forgé, et leur bobinage d'excitation on connecte en série avec le bobinage d'induit. Le champ magnétique supplémentaire, créé par eux, permet d'améliorer la commutation.

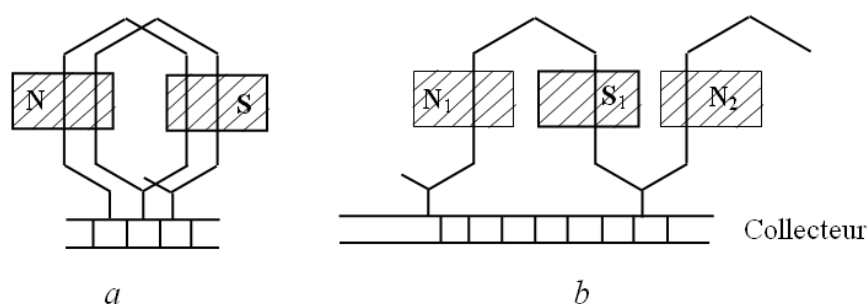
La pièce tournante de la MCC – l'induit, qui est composé des enroulements 4 et d'un collecteur 5 (voir la figure. 10.1, *b*). Le noyau d'induit est formé d'un assemblage de tôles laqué d'acier électrique (0,5 mm) pour réduire les pertes des courants de Foucault qui apparaissent à la rotation de l'induit dans le champ magnétique. Sur la surface extérieure de l'ancre il y a des encoches, dans lesquelles se trouve un bobinage fermé.



**Figure 10.1** – Inducteur (a) et induit (b) d'une MCC

Le bobinage de l'ancre est accompli du fil de cuivre isolé en forme des sections. Les sections du bobinage sont placés dans les rainures à deux couches, sont isolés et sont fixés à eux par les coins en bois, et les parties du bobinage sortant des extrémités de l'ancre des rainures, sont fixés par les bandages en acier de fil pour prévenir l'arrachement du bobinage des rainures à la rotation de l'ancre. Les sections des enroulements sont reliés entre eux et avec les plaques de collecteur et forment le bobinage fermé avec le nombre défini des branches parallèles. Le nombre de branches est définie par le type du bobinage.

On distingue les bobinages parallèles (de noeud) et les bobinages série (d'onde). De noeud (fig. 10.2,) ont le nombre des branches parallèles égales au nombre de paires des pôles de la machine, et d'onde (fig. 10.2,) forment une paire de branches parallèles.



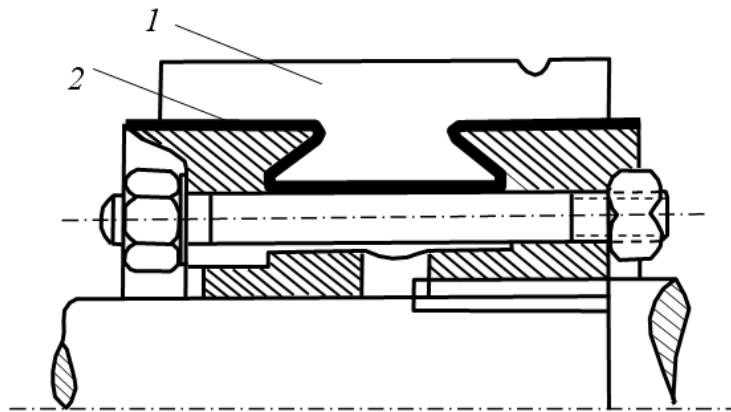
**Figure 10.2** – Types de bobinages des MCC

La simplicité et la fiabilité du bobinage successif conditionnent leur plus grande diffusion dans les machines de l'application générale.

Le collecteur (fig. 10.3), auquel on joint le bobinage de l'ancre, est composée des lames de cuivre 1, isolés les uns des autres et de l'arbre par les couches de micamit 2 (matériau isolant à base de mica).

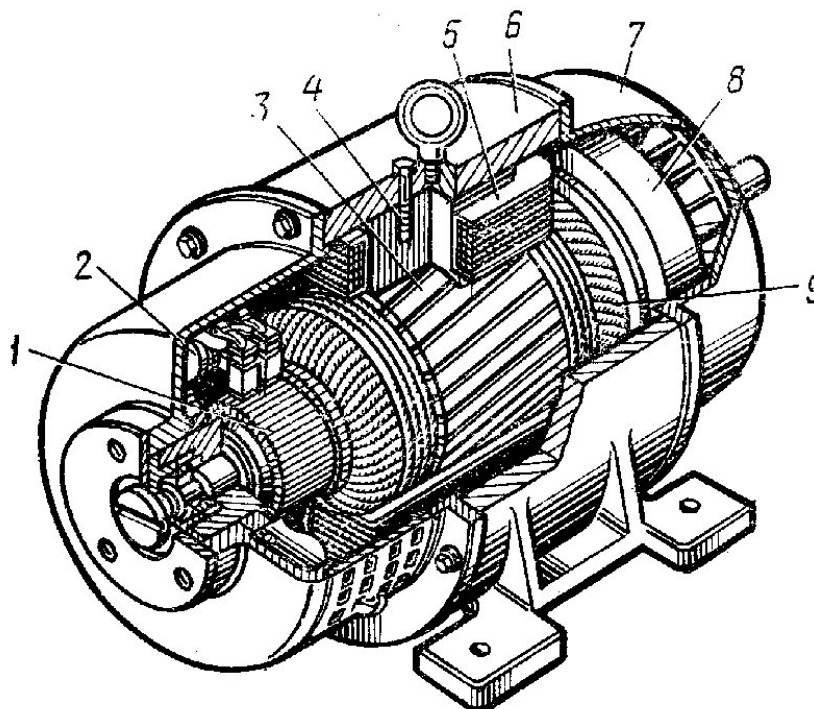
Le collecteur est destiné au redressement du courant alternatif de l'ancre pour la chaîne extérieure des générateurs. Dans les moteurs sa destination est le changement de la direction du courant des conducteurs du bobinage de l'ancre à sa rotation. On soude aux plaques du collecteur les sections du bobinage de l'ancre. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement

et symétriquement soudés aux lames du collecteur. Deux balais fixes et diamétralement opposés glissent par collecteur et assure le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.



**Figure 10.3** – Construction d'un collecteur du MCC

La construction de MCC assemblé montre la figure 10.4. À une culasse 6 par boulons sont fixés les pôles principaux qui comprend un cardiaque 4 et une bobines d'enroulement l'excitation 5. Des parties d'extrémité à culasse sont fixés les boucliers latéraux 7 avec roulements retenant l'arbre de la machine. L'ancre de la machine se compose d'un noyau 3, d'un bobinage 9 et d'un collecteur 1. Sur l'arbre de l'ancre est affermi le ventilateur 8, sur le collecteur sont placés les balais immobiles 2.



**Figure 10.4** – Constitution d'une MCC

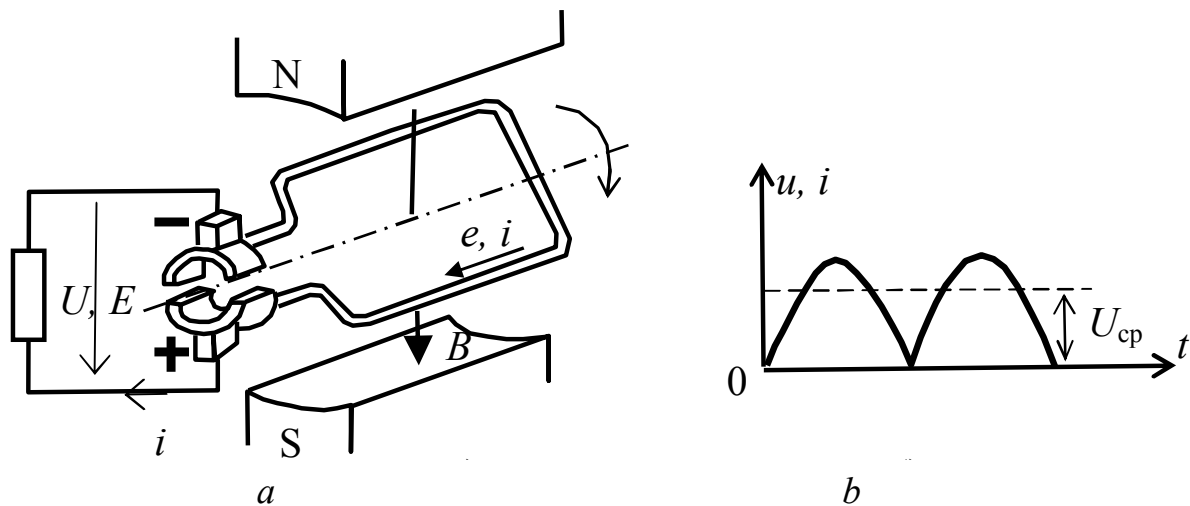
## 10.2 Principe de fonctionnement d'une génératrice à courant continu

Dans un générateur de courant continu se produit la conversion de l'énergie mécanique, amenée du moteur primaire, à l'énergie électrique, qui est retiré de l'enroulement d'induit à l'aide d'un collecteur et des balais. Aux balais du générateur on rejoint les consommateurs d'énergie électrique.

À la base du principe de l'action du générateur est le phénomène de l'induction électromagnétique, selon lequel on peut induire une force électromotrice dans un conducteur en le déplaçant dans un champ magnétique. L'intensité et la direction de cette f.é.m. est déterminée par la loi de Lenz-Faraday [70].

Considérons le concept de générateur de courant continu (fig. 10.5). Dans le champ magnétique créé par les pôles N et S tourne une spire du bobinage de l'ancré. Les extrémités de la spire sont connectés au collecteur le plus simple en forme de deux demi-cercles isolés l'un de l'autre, à qui adhèrent les balais *a* et *b*, qui sont reliés à la charge.

Si la spire tourne à vitesse constante dans le champ magnétique uniforme, alors on a la f.é.m. et le courant alternatif sinusoïdal dans cette spire. Puisque la charge est connectée aux balais à deux demi-cercles, malgré le fait qu'au changement des parties de la spire par endroits le courant en eux change son sens, dans le circuit extérieur il circule dans le même sens. Ainsi, les deux demi-cercles (les plaques de collecteur), effectuent la conversion du courant alternatif du bobinage de l'ancré en courant continu pulsatoire dans la chaîne extérieure du générateur (fig. 10.5, *b*).



**Figure 10.5** – Principe de fonctionnement du générateur de courant continu

Pour réduire les pulsations et obtenir les grandes valeurs de la f.é.m. le bobinage de l'ancré comprend la multitude des spires adjointes au nombre correspondant des lames de collecteur.

La f.é.m. du bobinage de l'ancré de la MCC est définie par la structure de la machine, la vitesse de la rotation de l'ancré et la valeur du flux magnétique, créé par le système de l'excitation

$$E = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60} \Phi = cn\Phi, \text{ V}, \quad (10.1)$$

avec :

$c = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60}$  – constante constructive de la machine dépendant du type du bobinage

de l'ancre et de nombre de paires de pôles ;

$N$  – nombre total des conducteurs de l'ancre ;

$\alpha$  – nombre de paires de branches parallèles de la bobine d'induit ;

$p$  – nombre de paires de pôles ;

$n$  – vitesse de rotation (en tr/min) ;

$\Phi$  – flux magnétique d'une paire de pôles de la machine (en Webers, Wb).

Ainsi, la f.é.m. de l'ancre est directement proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine et aux flux de force magnétique. D'habitude la vitesse de rotation de l'ancre est aussi une constante, c'est pourquoi le réglage de la valeur de la f.é.m., et par conséquent, et de la tension du générateur on reçoit par le changement du flux magnétique par voie du réglage du courant dans les bobinages d'excitation des pôles.

Si la chaîne extérieure du générateur est ouverte (le régime de la marche à vide), la tension aux bornes de la machine est égal à la f.é.m.  $U_0 = E$ . Si le générateur est chargé, alors le courant circule dans le bobinage de l'ancre, et la tension aux bornes de la machine devient moins de f.é.m. sur la valeur de la chute de tension sur la résistance dans la chaîne de l'ancre

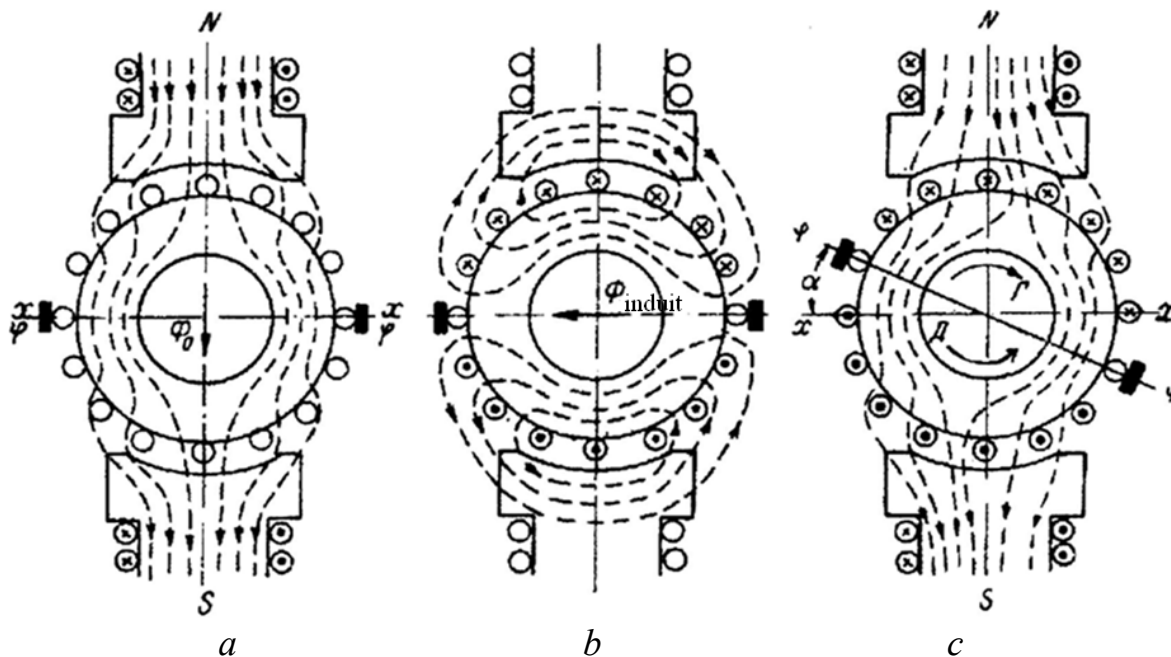
$$U = E - I_{\text{ancre}} \cdot R_{\text{ancre}} , \quad (10.2)$$

où  $R_{\text{ancre}}$  – résistance totale de la chaîne de l'ancre.

### 10.3 Réaction d'induit

Si un générateur (moteur) fonctionne sans charge, le champ magnétique est formé seulement par le courant passant dans le bobinage l'excitation. Ce flux de force magnétique principal des pôles  $\Phi_0$  (fig. 10.6, *a*) est dirigé perpendiculairement de l'axe de neutre géométrique ( $x - x$ ). Dans ce cas, la ligne neutre magnétique du champ (ligne  $\varphi - \varphi$ , qui passe par les points de la circonférence de l'ancre où l'induction est égale à zéro) coïncide avec l'axe de neutre géométrique.

Au fonctionnement du générateur sur une charge, le courant passe dans le bobinage d'induit. et crée un champ magnétique supplémentaire de l'induit  $\Phi_{\text{induit}}$ , immobile dans l'espace. L'axe du champ magnétique de l'induit  $\Phi_{\text{induit}}$  coïncide avec l'axe des balais (fig. 10.6, *b*). L'intensité de ce champ dépend du courant de charge du générateur. Le champ magnétique de l'induit s'impose sur le champ magnétique principal des pôles, le déforme et l'affaiblit partiellement. Cette influence du champ de l'induit sur le flux principal des pôles s'appelle la **réaction d'induit** (fig. 10.6, *c*).



**Figure 10.6 – Réaction d'induit**

En conséquence de la saturation de l'acier des pôles le renforcement du champ est moins que l'affaiblissement, c'est pourquoi le flux résultant des pôles diminue.

La distorsion du champ magnétique entraîne le décalage de la ligne neutre magnétique sur un certain angle  $\alpha$  (dans les générateurs – en direction de la rotation, dans les moteurs – contre la direction de la rotation). Cet angle dépend de la charge du générateur (moteur), i.e. du courant d'induit.

Lorsque la machine fonctionne en régime du générateur sous l'influence de la réaction d'induit le champ résultant se renforce sur le bord s'éloignant du pôle et s'affaiblit sur le bord accourant. Lors du fonctionnement en mode moteur à la même direction de la rotation il y a un renforcement du champ résultant sous le bord accourant du pôle et – l'affaiblissement sous le bord s'éloignant. En conséquence de cela le générateur diminue la f.é.m. et la tension sur ses bornes, et le moteur diminue le moment électromagnétique et change la fréquence de rotation. Outre cela, la réaction d'induit provoque l'étincellement sous les balais qu'amène vers la brûlure des tôles de collecteur.

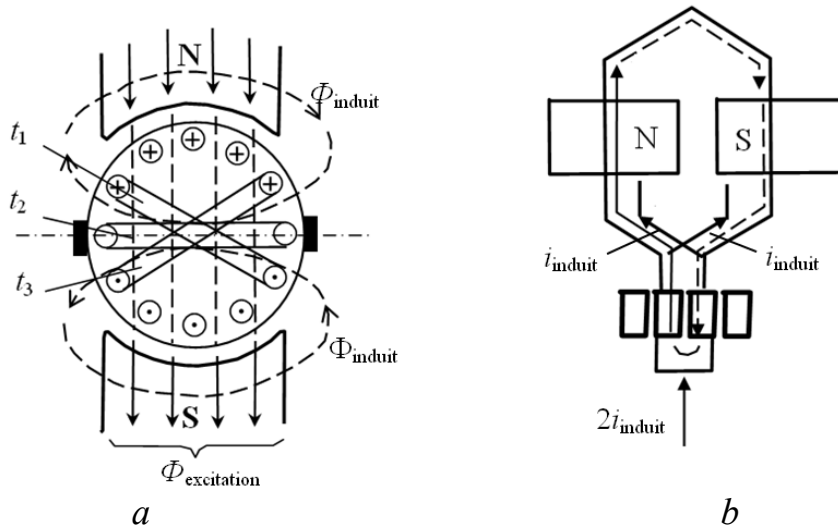
Un moyen efficace de la réduction de l'influence du champ du bobinage d'induit sur le champ des pôles principaux est l'application d'une **bobine de compensation**, dont les conducteurs actifs sont placés aux rainures de la surface des pièces polaires. La bobine de compensation fait partie successivement avec le bobinage d'induit pour que les flux de force magnétique créés par ces bobinages soient dirigés contre et étaient compensés mutuellement.

## 10.4 Commutation dans les machines à courant continu

Le processus de la commutation des sections d'une branche parallèle à l'autre en fermant ces sections par les balais et l'ensemble des phénomènes liés au changement du courant dans les sections commutées, est appelé commutation.

Pour expliquer le processus de la commutation examinons la figure 10.7, *a*, où est présenté l'induit d'une des sections à différents moments du temps  $t_1$ ,  $t_2$ , et  $t_3$ . Selon les sens du courant indiqués dans les conducteurs de l'induit on peut conclure qu'au moment  $t_3$  section examinée a passé d'une branche parallèle à l'autre et le courant dans cette section a changé le sens à l'inverse. Pendant le temps entre les moments  $t_1$  et  $t_3$ , quand la section examinée avec deux lames de collecteur et le balai forment un contour en court-circuit (fig. 10.7, *b*), le courant dans elle change de  $+i_{\text{induit}}$  jusqu'à  $-i_{\text{induit}}$ . Quand le courant se change, dans la section commutée est induite la f.é.m. d'inductance propre  $e_L = -L \frac{di_{\text{induit}}}{dt}$ . Dans la

machine réelle le balai bloque habituellement deux-trois lames de collecteur, et le changement du sens du courant se passe simultanément dans quelques sections voisines. C'est pourquoi dans chacune des simultanément commutées sections sont induites des f.é.m. l'induction mutuelle  $e_M$ . La somme de la f.é.m. d'inductance propre et de la f.é.m. l'induction mutuelle on appelle la **f.é.m. réactive**  $e_R$ .



**Figure 10.7** – Commutation des sections du bobinage d'induit :  
*a* – processus de la commutation des sections ; *b* – disposition mutuelle du balai et du collecteur en train de la commutation

Excepté la f.é.m. réactive  $e_R$ , dans la section commutée est induit aussi la f.é.m. dynamique (de la rotation)  $e_d$  parce qu'elle traverse le champ magnétique résultant (le champ de la bobine d'induit et le champ des pôles principaux).

La f.é.m. résultante de la section commutée  $e_C = e_L + e_R + e_d$  peut provoquer dans le contour en court-circuit le courant considérable de commutation

$$i_{\text{comm}} = \frac{e_C}{R_c} = \frac{e_L + e_R + e_d}{R_c}, \quad (10.2)$$

où  $R_c$  – résistance de contour de commutation.



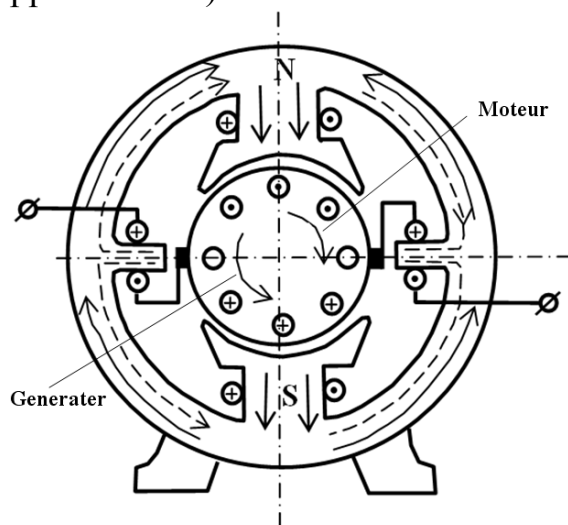
Puisque chaque section dispose d'inductance, une interruption de courant lors du passage de la section d'une branche parallèle à l'autre provoque une augmentation de la tension à l'endroit de déclenchement et la formation d'étincelage entre le balai et la lame de collecteur. L'étincelage sera d'autant plus forte qu'il est plus grand le courant de commutation  $i_{comm}$ .

De (10.2) il vient que diminuer le courant  $i_{comm}$  et par cela améliorer la commutation de la machine on peut :

- en augmentant la résistance de la chaîne de la section commutée ;
- en diminuant la f.é.m. réactive  $e_R$  ;
- en créant dans la chaîne de la section commutée de la f.é.m., qui va compenser  $e_R$ .

Le premier de ces moyens d'améliorer la commutation se résume à un choix de balais, dont les résistances sont grandes.

La méthode la plus efficace de la lutte contre l'étincelage est l'installation dans la machine des pôles supplémentaires, créant dans la zone de commutation un champ magnétique, dirigé à la rencontre du champ de l'induit. Dans ce cas dans la section commutée est induit la f.é.m. de la rotation, ce qui compense la f.é.m. réactive et diminue la f.é.m. de la section commutée, améliorant ainsi la commutation de la machine. Le nombre des pôles supplémentaires est d'habitude égal au nombre des pôles principales (seulement les machines d'une puissance de 300 W à 3,5 kw peuvent avoir deux pôles principaux et un pôle supplémentaire).



**Figure 10.8** – Schéma d'inclusion des bobinages des pôles supplémentaires

On installe les pôles supplémentaires sur les neutres géométriques et on connecte leur bobinage successivement au bobinage d'induit.

La figure 10.8 monte la direction des flux magnétique et la polarité des pôles supplémentaires lorsque la machine fonctionne en générateur et en moteur en tenant compte du sens de rotation. La chaîne magnétique des pôles supplémentaires doit être insaturée, car seulement en ce cas l'induction dans le jeu sous le pôle supplémentaire change en proportion

du courant de l'induit, et la valeur de la force magnétisante des pôles supplémentaires – en fonction de la charge.

Dans les machines irréversibles de faible puissance avec un nombre des pôles supplémentaires diminué l'amélioration de la commutation (diminution  $e_{comm}$ ) peut être atteinte par le déplacement des balais du neutre géométrique au fonctionnement en régime du générateur en direction de la rotation de l'induit, et en régime du moteur – contre la rotation de l'induit.

On peut voir le processus de la commutation dans les machines à courant continu sur site web [72].

### 10.5 Pertes d'énergie et rendement

Les processus de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et vice versa, passant dans une machine à courant continu, sont accompagnés des pertes d'énergie. Ces pertes subdivisent sur pertes électriques, magnétiques, mécaniques et supplémentaires.

Les pertes électriques ce sont les pertes dans les bobinages de l'induit et les bobinages de l'excitation, ainsi que les pertes dans le contact de balai.

Les pertes dans les bobinages de l'induit et dans les bobinages successifs de l'excitation sont proportionnelles au carré du courant et sont égaux  $I^2 \cdot R$ , où  $R$  – la résistance de la chaîne d'induit de la machine. Les pertes électriques dans les contacts de balai on définit à partir du courant de la chaîne d'induit et de la chute de tension sous les balais d'une polarité

$$\Delta P_{\text{balais}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{balais}} \cdot I_{\text{induit}} . \quad (10.3)$$

Les pertes électriques dans les résistances de la chaîne d'induit, y compris dans le contact de balai, font environ 50 % de toutes les pertes dans la machine.

La perte d'énergie dans la bobine d'excitation des machines à excitation, indépendante, dérivée et composée on détermine par la puissance, absorbée par cette bobine  $\Delta P_{\text{exc}} = U_{\text{exc}} \cdot I_{\text{exc}}$ . Ils font de 0,5 à 7% de la puissance nominale de la machine, et un plus petit pourcentage de pertes se rapporte à la plus puissante des machines.

Les pertes électriques totales dans la machine à courant continu

$$\Delta P_{\text{électrs}} = I_{\text{induit}}^2 \cdot R_{\text{induit}} + I_{\text{induit}}^2 \cdot R_{\text{exc}} + I_{\text{induit}}^2 \cdot R_{\text{pôles.supl.}} + \Delta P_{\text{balais}} , \quad (10.4)$$

où  $R_{\text{exc}}$ ,  $R_{\text{pôles.supl.}}$  sont les résistances de la bobine d'excitation série et du bobinage des pôles supplémentaires.

Dans les machines à courant continu le flux magnétique est immobile dans l'espace et est constant dans le temps. C'est pourquoi la remagnétisation rotatoire subit seulement l'acier de l'induit, à cause de quoi son noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Les pertes magnétiques dans l'acier de l'induit  $\Delta P_{\text{fer}}$  font moins de 1–3% de la puissance nominale de la machine. Comme les pertes magnétiques on comprend également les pertes dans les pièces polaires, dans les pôles principaux et la culasse, conditionné par les pulsations du flux de force magnétique, dont la cause est des encoches à la conception de l'induit.

Les pertes mécaniques  $\Delta P_{\text{mécs}}$ , dont composants sont les pertes par frottement dans les paliers, par ventilation et par frottement des balais sur le collecteur, dépendent de la fréquence de rotation de l'induit, et pour les machines d'une puissance de 10–500 kW font 0,5%–2% de  $P_{\text{nom}}$  (un plus petit pourcentage se réfère aux machines la plus puissante).

Les machines à courant continu ont d'autres pertes, réunies en groupe des pertes supplémentaires  $\Delta P_{\text{supl}}$ . Habituellement, ils sont supposés égaux  $0,01 \cdot P_{\text{nom}}$ .

En connaissant la somme de toutes les pertes dans la machine

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{électrs}} + \Delta P_{\text{fer}} + \Delta P_{\text{mécs}} + \Delta P_{\text{supls}}, \quad (10.5)$$

on peut définir son rendement (en pourcentage) :

pour les générateurs 
$$\eta = \left( 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_2 + \Delta P_{\Sigma}} \right) 100, \quad (10.6)$$

et pour les moteurs 
$$\eta = \left( 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1} \right) 100, \quad (10.7)$$

où :

$P_1$  – puissance amenée au moteur ;

$P_2$  – puissance utile rendue par le générateur.

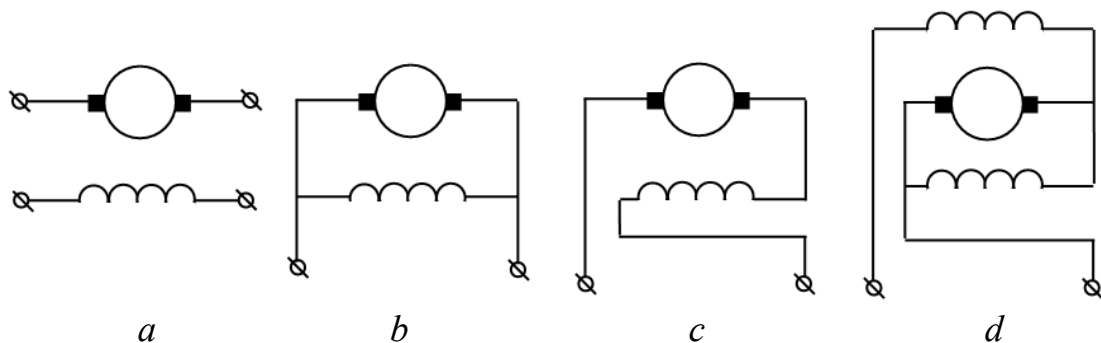
Les machines d'une puissance jusqu'à 100 kW ont le rendement de 75–90 %, de la puissance 500–1000 kW – 91–95 %.

## 10.6 Schémas de connexions des bobinages d'excitation

On distingue les machines à courant continu à excitation séparée, parallèle, série et composée.

L'enroulement d'excitation des machines à excitation séparée (fig. 10.9, *a*) est alimenté par une source de courant électrique indépendante qui n'est pas liée directement aux chaînes des circuits d'induit de la machine.

Dans une machine à excitation parallèle le bobinage d'excitation est relié en parallèle avec la chaîne de l'induit (fig. 10.9, *b*). En cas de nécessité on peut connecter le bobinage d'excitation de cette machine selon le schéma de l'excitation indépendante (séparée).



**Figure 10.9** – Schémas de connexion des bobinages d'excitation :

*a* – séparée ; *b* – parallèle ; *c* – série ; *d* – composée

Dans une machine à excitation série l'enroulement d'excitation est relié en série avec la chaîne de l'induit (fig. 10.9, *c*). Il est réalisé avec un fil d'une grande section, un petit nombre de spires et de faible résistance.

Sur les pôles principaux des machines à l'excitation composée (fig. 10.9, d) il y a deux bobines, dont l'une est reliée à la chaîne de l'induit successivement, et la seconde – parallèlement.

Les MCC de faible puissance (quelques dizaines–des centaines de watts) le champ magnétique d'excitation est créé par les aimants permanents.

La diversité des schémas de connexions des enroulements d'excitation détermine la différence des caractéristiques et des propriétés des générateurs et des moteurs de courant continu.

### 10.7 Paramètres nominaux et caractéristiques des MCC

Les paramètres nominaux des machines électriques ce sont leurs paramètres qui caractérisent le mode nominal de la machine, i.e. le mode de fonctionnement pour lequel elle est fabriquée.

La puissance nominale d'une MCC c'est : en mode générateur – la puissance électrique, rendue à la chaîne extérieure ; en mode moteur – la puissance utile mécanique sur l'induit.

A l'aide des valeurs nominales des paramètres, on peut choisir une ou l'autre MCC, déterminer la rationalité de sa utilisation en concrète l'installation l'électro-technique, assurer la bonne mise en œuvre technique en vue de sa fonctionnement fiable dans la limite du délai établi.

Il convient d'analyser les propriétés et les caractéristiques des machines électriques à l'aide des graphiques – des caractéristiques, qu'on peut trouver dans les recueils de données techniques ou dans les catalogues, ou bien les obtenir par la voie expérimentale ou par voie de calcul.

Le plus grand intérêt pratique pour les générateurs représente la dépendance de la tension à ses bornes  $U$  du courant de charge  $I_{\text{induit}}$  pour la vitesse de la rotation  $\omega$  et le courant du bobinage d'excitation  $I_{\text{exc}}$  constantes. Cette dépendance on l'appelle la **caractéristique extérieure**  $U = f(I_{\text{induit}})$ . Souvent on utilise la **caractéristique de la marche à vide**, qui représente la dépendance de la tension  $U$  du courant d'excitation  $I_{\text{exc}}$  lors de la vitesse de rotation constante et de circuit externe ouvert ( $I_{\text{induit}} = 0$ ). De sorte que la tension de l'alternateur est égale à sa force électromotrice  $E$ , la caractéristique de la marche à vide est la dépendance  $E = f(I_{\text{exc}})$  lors de la  $\omega_{\text{nom}} = \text{const}$  et  $I_{\text{induit}} = 0$ .

Pour les MCC le plus grand intérêt présente la dépendance de la vitesse de rotation  $\omega$  de courant  $I_{\text{induit}}$  ou du couple  $M$  dans le cas où la tension d'alimentation est constant. La dépendance  $\omega = f(I_{\text{induit}})$  s'appelle **caractéristique de vitesse**, et la dépendance  $\omega = f(M)$  – **caractéristique mécanique**.

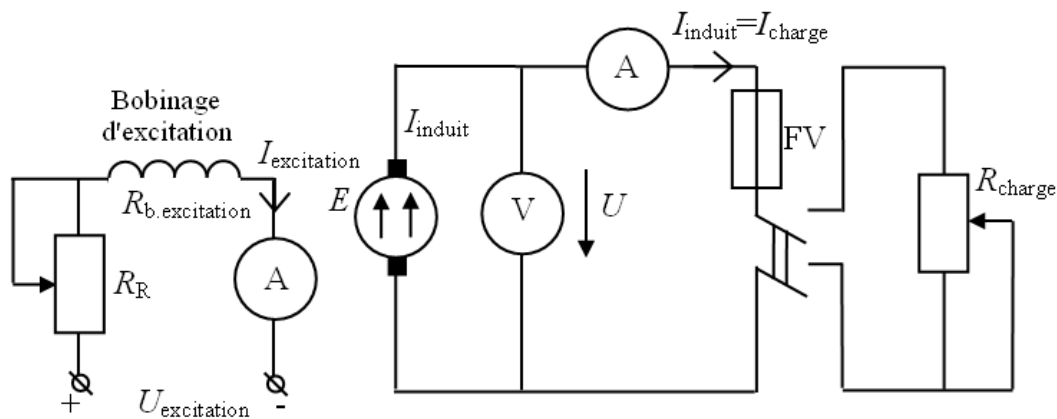
## 10.8 Génératrices à courant continu

**10.8.1 Génératrice à excitation indépendante.** Le schéma électrique de la génératrice est montré sur la figure 10.10. Le bobinage d'excitation est alimenté par une source auxiliaire du courant continu, dont la puissance est fait d'habitude 3–4 % de la puissance de la génératrice. Le courant dans le bobinage d'excitation est déterminée par la tension de la source et la résistance du circuit d'excitation

$$I_{\text{excitation}} = \frac{U_{\text{excitation}}}{R_{\text{b.excitation}} + R_R} \quad (10.8)$$

et ne dépend pas de la charge de la génératrice. En changeant la résistance du rhéostat de réglage  $R_R$ , on peut faire varier le courant d'excitation, et par conséquent, le flux magnétique de la machine, en changeant ainsi la F.E.M et la tension de la génératrice, de sorte que

$$U = E - I_{\text{induit}} \cdot R_{\text{induit}} = c \cdot n \cdot \Phi - I_{\text{induit}} R_{\text{induit}}.$$



**Figure 10.10** – Schéma d'une génératrice à excitation indépendante

En régime de la marche à vide  $I_{\text{induit}} = 0$  et  $U_0 = E = c \cdot n \cdot \Phi = f(I_{\text{exc}})$ . Cette dépendance de la f.é.m. du courant inducteur s'appelle la **caractéristique à vide**. Elle est montrée sur la figure 10.11, *a*.

La caractéristique à vide commence par les significations de la tension  $E_{\text{résiduel}}$  conditionné à  $I_{\text{exc}} = 0$  par le flux de la rémanence des pôles. La nature de cette caractéristique est déterminée par la courbe de magnétisation du circuit magnétique de la machine.

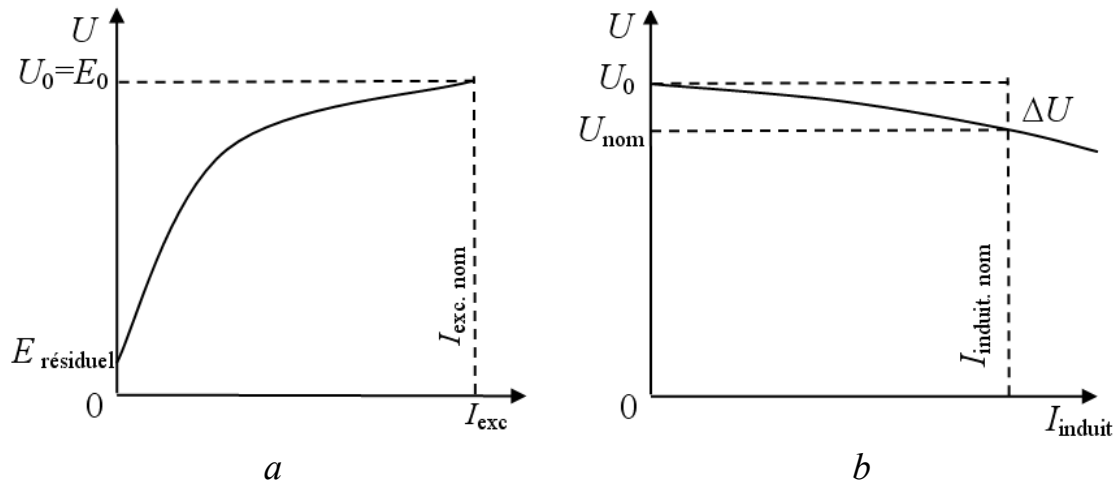
Le trait caractéristique des génératrice à l'excitation indépendante est la possibilité du réglage continu de la f.é.m., et par conséquent, de la tension aux bornes de la machine à grande échelle de 0 à  $U_{\text{nom}}$ .

En régime de charge la tension aux bornes de l'induit baisse principalement en raison de la chute de potentiel dans les résistances de la chaîne de l'induit, de sorte que  $U = E - I_{\text{induit}} \cdot R_{\text{induit}}$ . L'influence de la réaction d'induit dans la limite de la charge nominale du générateur n'est pas grande. Par conséquent, la réduction

de la tension aux bornes de la machine lors de l'augmentation du courant de l'induit de 0 à  $I_{\text{induit.nom}}$  est négligeable et fait

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{nom}}}{U_{\text{nom}}} = 5 \div 10\%. \quad (10.9)$$

La dépendance  $U = f(I_{\text{induit}})$  est appelé *caractéristique extérieur* de la génératrice et est illustrée à la figure 10.11, *b*. La tension de la génératrice on peut maintenir constant en changeant un peu le courant inducteur par le rhéostat régulateur  $R_R$  (voire figure 10.10).



**Figure 10.11** – Caractéristique d'une génératrice à excitation indépendante : *a* – à vide ; *b* – extérieur

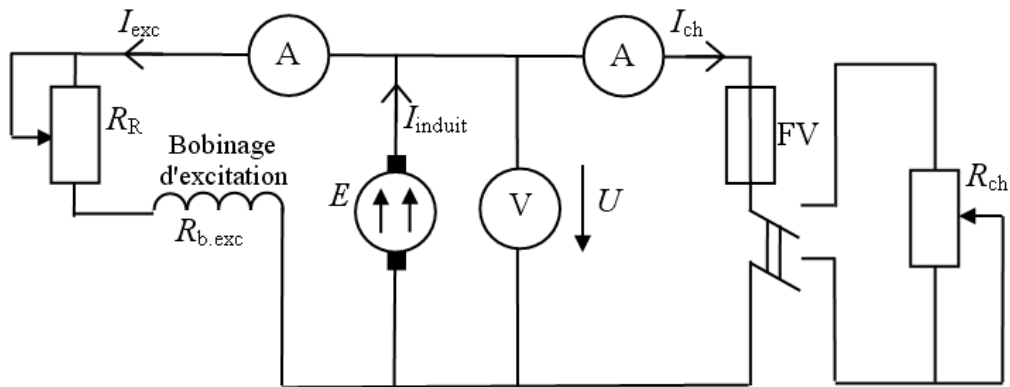
L'inconvénient de la génératrice à courant continu consiste en nécessité d'avoir la source d'alimentation auxiliaire pour la chaîne de l'excitation. En cas de surcharge de la génératrice au-delà de la puissance nominale, la tension aux bornes de la machine diminue plus fortement en raison de l'action augmentant désaimantant de la réaction de d'induit. Le courant de l'induit augmente et, en cas de court-circuit atteint d'une valeur  $I_{c-c} = (15-20) \cdot I_{\text{nom}}$ . C'est pourquoi, pour prévenir l'endommagement de la génératrice il faut installer une protection, qui la déconnecte au court-circuit (par exemple, le fusible FV sur la figure 10.10).

**10.8.2 Génératrice à excitation dérivée.** Le schéma électrique d'une génératrice est présenté sur la figure 10.12. Le bobinage d'excitation est connecté en parallèle des bornes de l'induit. Elle est calculée sur un petit courant  $I_{\text{exc}} = (0,01-0,03) \cdot I_{\text{nom}}$  et a un grand nombre des spires du fil de petite section. Le courant dans le bobinage d'excitation est défini par la tension sur les bornes de l'induit et la résistance de la chaîne de l'excitation

$$I_{\text{ecc}} = \frac{U}{R_{\text{ecc}}} = \frac{E - I_{\text{induit}} R_{\text{induit}}}{R_{\text{bobin.ecc}} + R_R}. \quad (10.10)$$

La nature de la *caractéristique à vide*  $E = f(I_{\text{exc}})$  (fig. 10.13, *a*) est similaire à la caractéristique du générateur avec l'excitation indépendante. Le générateur

stablement s'excite dans le cas, si  $E > I_{exc} \cdot R_{exc}$ , c'est-à-dire si la caractéristique à vide  $E = f(I_{exc})$  se trouve plus haut que la caractéristique de la chaîne de l'excitation (la ligne droite  $U = I_{exc} \cdot R_{exc}$ ). Le point d'intersection de ces caractéristiques définit la f.é.m. finale, et donc la tension, jusqu'à qui s'excite le générateur. Si  $E \leq I_{exc} \cdot R_{exc}$ , l'auto-excitation de la machine ne se passe pas. La résistance de la chaîne de l'excitation, qui détermine le début définissant de l'autoexcitation (le seuil de l'autoexcitation), s'appelle la **résistance critique**. Dans ce cas la tension aux bornes de l'alternateur est instable.



**Figure 10.12** – Schema d'une génératrice à excitation dérivée

Cette particularité réduit les propriétés régulatrices d'une génératrice. La tension stable en mode à vide pour les génératrices de l'exécution normale fait  $(0,6-0,7) \cdot U_{nom}$ . Pour l'élargir la gamme de régulation de tension on applique les pôles spéciaux qui ont les terrains saturés et assure la tension stable de  $0,2 \cdot U_{nom}$ .

En régime de charge la tension aux bornes de la machine diminue plus que de l'alternateur avec excitation séparée. Cela s'exprime par le fait que la tension diminue non seulement en raison de l'augmentation de la chute de tension dans la chaîne de l'induit ( $U = E - I_{induit} \cdot R_{induit}$ ) et de réaction de l'induit, mais aussi à cause de la diminution du courant d'excitation, de sorte que

$$I_{exc} = \frac{U}{R_{exc}} = \frac{E - I_{induit} R_{induit}}{R_{exc}}. \quad (10.11)$$

L'influence de la réaction d'induit et la réduction du courant d'excitation se manifeste rudement particulièrement à l'augmentation de la charge au-dessus de la nominale. Le changement de la résistance de charge dessous d'une certaine valeur conduit à une diminution du courant de charge en raison de la forte diminution de la force électromotrice du générateur.

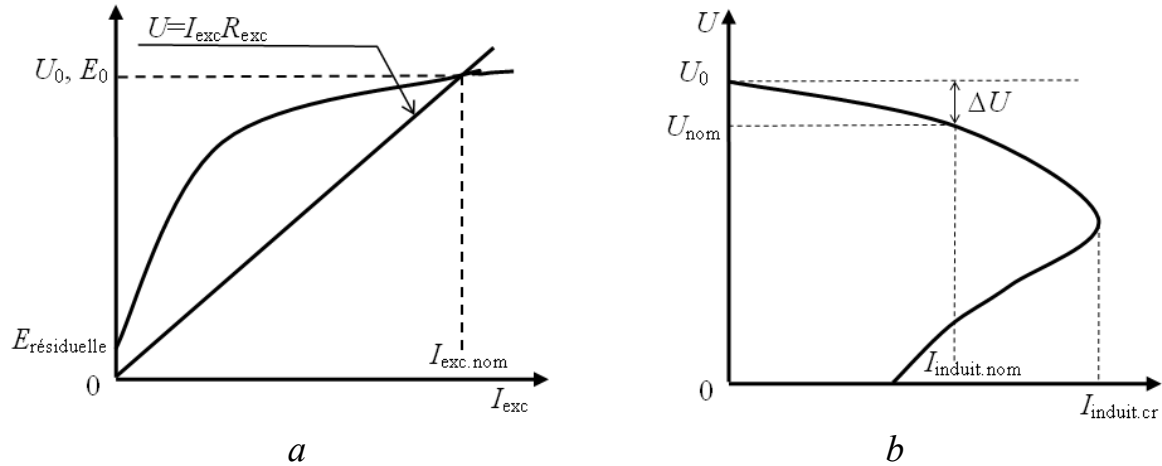
Le courant du générateur, le plus grand possible, est appelé **courant critique**. Il fait  $I_{cr} = (2-2,5) \cdot I_{nom}$ . Le courant de court-circuit des génératrices à excitation dérivée est défini par la f.é.m. résiduelle et la résistance de l'induit

$$I_{c-c} = \frac{E_{resid}}{R_{induit}}. \quad (10.12)$$

Les machines de grande puissance ont le courant de court-circuit un peu plus que le courant nominal. La caractéristique extérieure d'une génératrice à excitation dérivée est montrée sur la figure 10.13, *b*. La réduction de la tension sur les bornes d'induit lors de l'augmentation de la charge du générateur jusqu'à la valeur nominale fait

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{nom}}}{U_{\text{nom}}} 100 = 10 \div 15\% . \quad (10.13)$$

On peut maintenir la tension du générateur aux constantes, en changeant le courant d'excitation au moyen du rhéostat régulateur  $R_R$ .



**Figure 10.13** – Caractéristique d'une génératrice à excitation dérivée :  
*a* – à vide ; *b* – extérieur

On utilise les génératrices à excitation dérivée dans les cas où il est nécessaire de maintenir la tension constante sur la charge ou lors de la régulation de la tension dans les limites définies.

**10.8.3 Génératrice à excitation série.** Le schéma électrique d'une génératrice est présenté sur la figure 10.14, *a*. Le bobinage d'excitation de cette génératrice fait partie successivement avec l'induit, est calculé sur le courant de l'induit, car  $I_{\text{exc}} = I_{\text{induit}} = I_{\text{nom}}$  et a un petit nombre des spires du fil de la grande section. La caractéristique à vide du générateur à l'excitation successive peut être facturée uniquement en cas d'alimentation de l'enroulement d'excitation de la source auxiliaire et elle a le même caractère que la caractéristique du générateur avec l'excitation indépendante.

L'autoexcitation du générateur se passe à la chaîne fermée de l'induit. Le courant de l'induit, en passant par le bobinage de l'excitation, augmente le champ magnétique des pôles, et par conséquent, la f.é.m. de la machine et la tension sur les bornes de l'induit, de sorte que

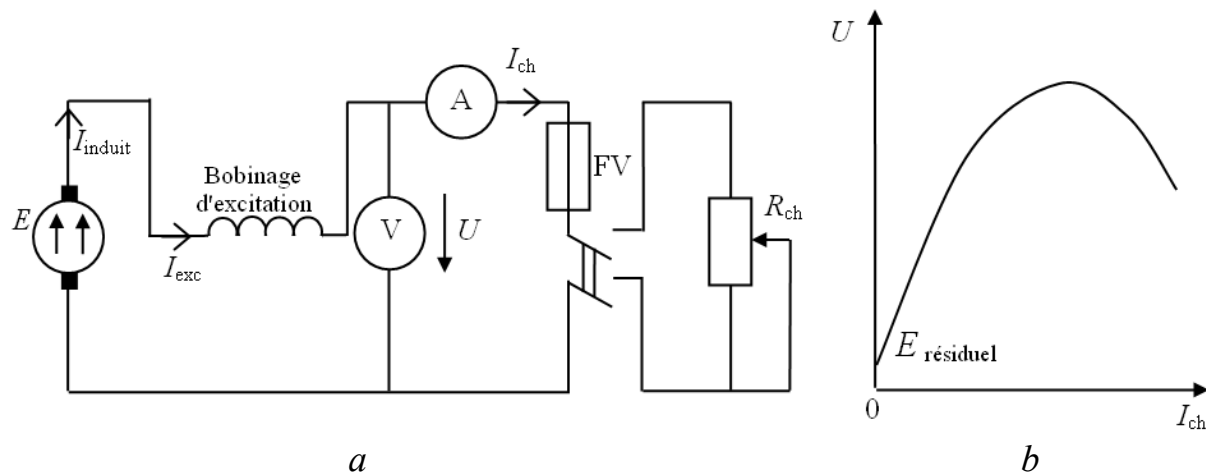
$$U = E - I_{\text{induit}}(R_{\text{induit}} + R_{\text{exc}}). \quad (10.14)$$

À l'augmentation du courant de charge le courant de l'induit et la tension augmentent aussi. Après la saturation de la chaîne magnétique de la machine l'augmentation de la tension cesse, et à l'augmentation suivant du courant de



charge, la tension commence à diminuer à cause de l'augmentation de sa chute dans les résistances de l'induit et du bobinage d'excitation et l'action désaimantant de la réaction de l'induit.

La caractéristique extérieure d'une génératrice à excitation série est représentée sur la figure 10.14, *b*. Le générateur peut être appliqué pour l'alimentation de la charge constante.



**Figure 10.14** – Génératrice à excitation série :  
*a* – schéma électrique ; *b* – caractéristique extérieure

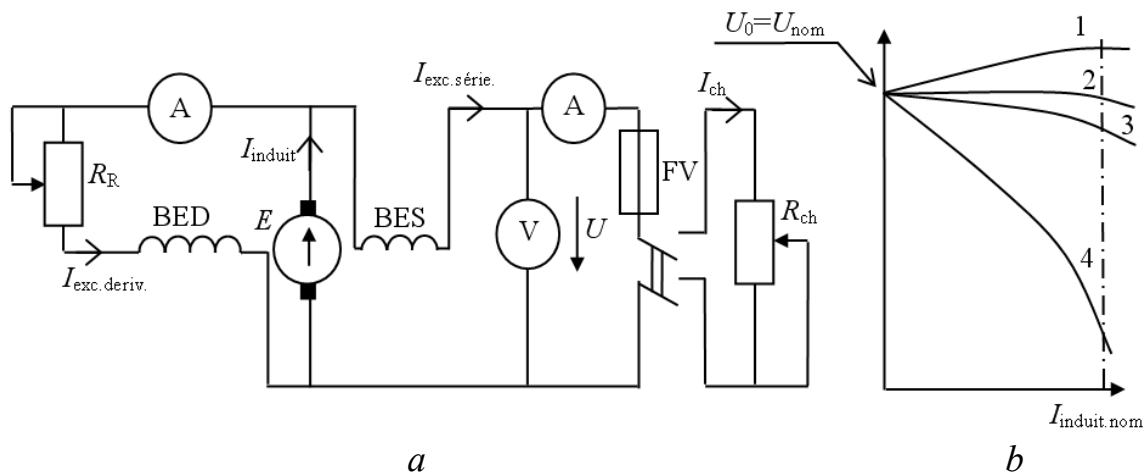
La propriété du bobinage successif de l'excitation d'augmenter la tension du générateur avec la croissance de la charge est utilisé pour réaliser la compensation de la réduction de la tension, qui est observée chez les génératrices à l'excitation dérivée.

**10.8.4 Génératrice à excitation composée.** Le schéma électrique d'une génératrice à excitation composée est présenté sur la figure 10.15, *a*. La génératrice a deux bobinages de l'excitation : en dérivation BED, inséré parallèlement à l'inducteur, et en série BES. Le bobinage en dérivation est calculé sur un faible courant  $I_{exc.dériv.} = (0,01-0,03) \cdot I_{nom}$ , elle a un grand nombre des spires du fil de la petite section. Le bobinage en série est calculé sur le courant de charge  $I_{nom} = I_{exc.série.} = I_{induit} - I_{exc.dériv.}$  et elle a un petit nombre des spires du fil de la grande section. Grâce à la présence du bobinage parallèle la génératrice à excitation composée peut entraîner sa « auto-excitation » même si le circuit de charge est ouverte. La caractéristique à vide a la même nature que la caractéristique de la génératrice à l'excitation dérivée.

Lors de la connection d'une charge il y a un courant dans le bobinage successif de l'excitation, qui crée le champ magnétique supplémentaire  $\Phi_{série} = f(I_{ch})$ . Si ce bobinage est activée de sorte que les flux magnétiques des deux bobinages d'excitation se forment, i.e. le flux magnétique des pôles  $\Phi = \Phi_{dérive} + \Phi_{série}$ , la f.é.m. de la machine à l'augmentation de la charge augmentera, puisque augmente le flux du bobinage en série. Cela permet de compenser la réduction de la tension sur les bornes de la machine de la réaction

d'induit et de la chute de potentiel dans les résistances de l'induit et du bobinage d'excitation en série, puisque

$$U = c \cdot n \cdot (\Phi_{\text{dérivé}} - \Phi_{\text{série}}) - I_{\text{induit}} \cdot (R_{\text{induit}} + R_{\text{exc.série}}). \quad (10.15)$$



**Figure 10.15** – Génératrice à excitation composée :  
*a* – schéma électrique ; *b* – caractéristique extérieure

C'est pourquoi la caractéristique extérieure du générateur (courbe 2, fig. 10.15) est située plus haut que la caractéristique du générateur à l'excitation dérivée (courbe 3). Par voie du réglage  $R_R$  on peut recevoir l'augmentation de la tension lors de la croissance de la charge (courbe 1).

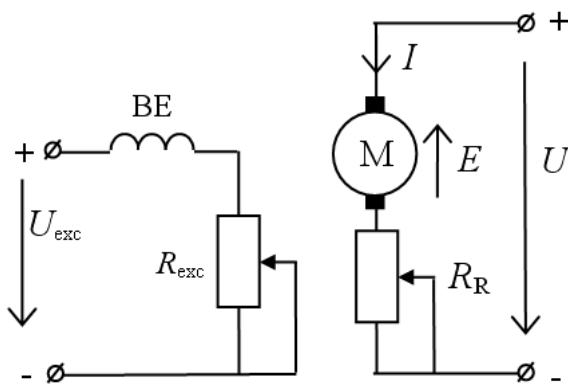
La génératrice, dont le couplage des bobinages d'excitation dérivée et série est coordonnée, est appliquée dans les cas où il est nécessaire de régler la tension du consommateur (en changeant le courant  $I_{\text{exc.dérivée}}$  par la résistance  $R_R$ ), ou quand il est nécessaire de maintenir automatiquement la tension constante à la charge changeant.

En certains cas, par exemple, dans les groupes de machines de soudure, il est nécessaire pour qu'à la croissance de la charge la tension diminue plus rudement, que la tension du générateur à l'excitation dérivée. Pour obtenir d'une telle caractéristique tombant (la courbe 4, fig. 10.15, *b*) on connecte le bobinage série en opposition pour que le flux de force magnétique résultant diminuait avec la croissance de la charge  $\Phi = \Phi_{\text{dérivé}} - \Phi_{\text{série}}$ . Alors la tension (10.15) aussi diminuera aussi avec l'augmentation du courant de charge.

## 10.9 Moteurs à courant continu

**10.9.1 Moteur à courant continu d'excitation séparée.** Le schéma électrique du *moteur à courant continu* d'excitation séparée (indépendante) est présenté sur la figure 10.16. L'ancre du moteur  $M$  et son bobinage d'excitation BE sont alimentés de différentes indépendantes l'un de l'autre sources de la tension  $U$  et  $U_{\text{exc}}$  ce qui permet de régler séparément la tension à l'induit du moteur et au bobinage d'excitation et les accomplir divers par la tension nominale. Seulement si on a un réseau du courant continu, le bobinage d'excitation est alimenté par la même source de tension que l'induit du moteur.

Mais aussi dans ce cas le courant d'excitation  $I_{\text{exc}}$  ne dépend pas du courant de l'induit  $I$  du moteur.



**Figure 10.16** – Schéma d'un moteur à courant continu à excitation indépendante

Les sens du courant  $I$  et de la f.é.m. de rotation du moteur  $E$ , présentés dans la figure 10.16, correspondent au mode moteur, quand l'énergie électrique est consommée par le moteur à partir du réseau électrique (à partir de la source de tension  $U$ ) et est convertie en énergie mécanique. Sur l'arbre du moteur se produit le couple électromagnétique  $M_{\text{él.m.}}$ . Le couple utile  $M$  sur l'arbre du moteur est

moins que le couple électromagnétique sur la valeur de couple opposé, créé dans la machine par les forces de frottement qui sont égales au couple du mode à vide, i.e.

$$M = M_{\text{él.m.}} - M_{\text{m.à.v.}} \quad (10.16)$$

La puissance mécanique du moteur  $P$  peut être exprimée à l'aide du couple et la vitesse angulaire par un rapport

$$P = \omega \cdot M, \quad (10.17)$$

avec :

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \text{ – vitesse angulaire d'induit, rad/s ;}$$

$n$  – fréquence de la rotation, tr/min.

Alors le couple utile du moteur  $M$  (H·m), exprimé dans la puissance utile  $P$ , kW, sera défini comme il suit

$$M = \frac{P}{\omega}. \quad (10.18)$$

La dépendance du moteur entre  $M$  et  $\omega$  est définie par sa **caractéristique mécanique**. L'expression analytique de la caractéristique mécanique du moteur peut être reçue de l'équation de l'équilibre des tensions rédigé pour la chaîne de l'induit du schéma (fig. 10.16). Au **mode établi** du moteur la tension appliquée  $U$  est équilibrée par une chute de tension dans la chaîne de l'induit  $I \cdot R$  et induite dans l'induit une F.E.M. de la rotation  $E$ , i.e.

$$U = I \cdot R + E, \quad (10.19)$$

où :

$I$  – courant dans la chaîne de l'ancrage du moteur, A ;

$R$  – résistance totale de la chaîne de l'ancrage, l'Ohm, incluant la résistance extérieure du résistor  $R_R$  et la résistance intérieure de l'induit du moteur  $R_{\text{induit}}$ .

La f.é.m. de la rotation est définie par la vitesse de la rotation de l'induit et la valeur du flux de force magnétique

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (10.20)$$

où :

$k$  – coefficient, dépendant des paramètres constructifs du moteur ;

$k = p \cdot N / 2\pi \cdot a$  ( $p$  – nombre de paires de pôles du moteur ;

$N$  – nombre des conducteurs actifs du bobinage d'induit ;

$a$  – nombre de paires des branches parallèles du bobinage d'induit. ) ;

$\Phi$  – flux de force magnétique, Vb ;

$\omega$  – vitesse angulaire d'induit, rad/s.

Si à (10.19) au lieu de  $E$  mettre sa signification de (10.20), nous recevrons l'équation pour la vitesse du moteur

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (10.21)$$

qui représente une dépendance de la vitesse du moteur du courant de l'induit. Une telle dépendance  $\omega = f(I)$  est appelée **caractéristique électromécanique du moteur**.

Pour obtenir une équation du caractéristique mécanique il faut trouver la dépendance de la vitesse de couple moteur. Le couple, maintenus par un moteur, est lié au courant de l'induit et au flux magnétique par une dépendance

$$M = k \cdot \Phi \cdot I. \quad (10.22)$$

En remplaçant dans (10.21) la valeur du courant  $I$  par la valeur constatée à partir de (10.22), nous recevrons l'expression de la **caractéristiques mécaniques du moteur**:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}, \quad (10.23)$$

ou

$$\omega = \frac{U}{c} - \frac{M \cdot R}{c^2}, \quad (10.24)$$

où

$$c = k \cdot \Phi. \quad (10.25)$$

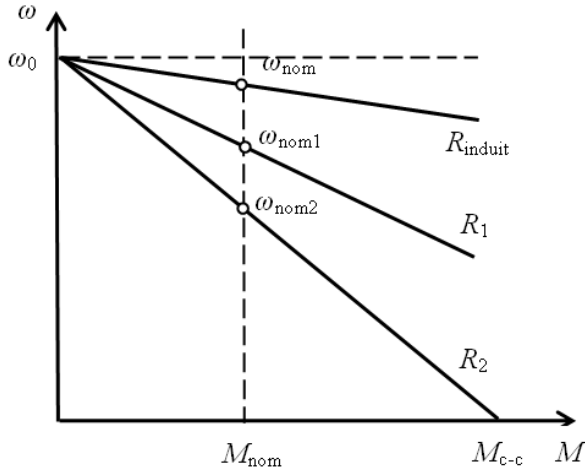
La caractéristique mécanique du moteur de l'excitation indépendante aux paramètres invariables  $U$ ,  $\Phi$  et  $R$  est la ligne droite. En changeant n'importe quel paramètre de la caractéristique mécanique, on peut recevoir de diverses vitesses du moteur, i.e. régler la vitesse de sa rotation.

Examinerons l'influence de la résistance de la chaîne de l'induit sur les caractéristiques mécaniques du moteur.

La figure 10.17 représente les caractéristiques mécaniques du moteur à excitation séparée pour les différentes résistances de la chaîne de l'induit.

Comme on voit de la figure 10.17, à  $M = 0$ , toutes les caractéristiques passent par un même point, étant sur l'axe d'ordonnées. La vitesse angulaire à ce point a une valeur qui ne dépend pas de la résistance de chaîne de l'induit. Cette vitesse s'appelle la **vitesse de la marche à vide idéale**  $\omega_0$  et est définie par l'expression

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (10.26)$$



**Figure 10.17** – Caractéristiques mécaniques du moteur à courant continu d’excitation séparée

À la vitesse de la marche à vide idéale, quand le courant en chaîne d’induit est égal à zéro, la f.é.m. de l’induit, dirigée à la rencontre de la tension appliquée, lui est égale en valeur absolue. Si jusqu’à l’application de la charge le moteur travaillait à une vitesse angulaire  $\omega_0$ , alors à l’apparition sur son arbre du couple de la résistance la vitesse angulaire baissera. La conséquence de cela sera la réduction de la f.é.m. de la rotation  $E$  conformément à (10.20) et l’augmentation du courant de

l’induit conformément à (10.19) et le couple du moteur (10.22). La vitesse angulaire va diminuer jusqu’à ce que le couple du moteur sera égale au couple de la résistance. La différence des significations des vitesses stabilisées du moteur avant et après l’application de la charge donnée statique s’appelle la **chute statique de la vitesse**.

Le deuxième membre de (10.24) caractérise la chute statique de la vitesse angulaire (dénivellation) par rapport à la vitesse angulaire de la marche à vide idéale :

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2} . \quad (10.27)$$

Ainsi, la relation de la vitesse du moteur peut être inscrite sous la forme suivante :

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega . \quad (10.28)$$

La ligne supérieure des caractéristiques (fig. 10.17) s’appelle la caractéristique naturel. On appelle comme une **caractéristique naturelle du moteur** une telle caractéristique qui est obtenu en l’absence des résistances externes dans la chaîne de l’induit et aux valeurs nominales de tension et de flux magnétique du moteur. La chute statique d’une caractéristique naturelle dépend de la résistance intérieure de la chaîne de l’induit du moteur  $R_{\text{induit}}$ , dont les composantes sont la résistance propre du bobinage d’induit, les résistances du bobinage des pôles supplémentaires, du bobinage de compensation et des balais. En conséquence la chute de la vitesse pour la caractéristique naturelle

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R_{\text{induit}}}{k^2 \cdot \Phi_{\text{nom}}^2} .$$

De (10.27) on peut déterminer la chute statique de la vitesse pour chacune des caractéristiques du moteur de l’excitation indépendante, présenté sur la

figure 10.17. Par exemple, avec un rhéostat supplémentaire ayant la résistance  $R_R$ , la chute statique de la vitesse sera définie par rapport

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot (R_{\text{induit}} + R_R)}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.29)$$

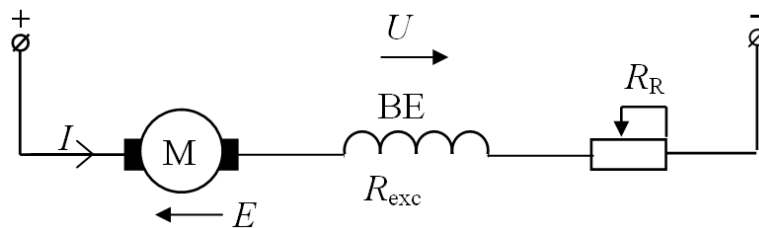
Ayant divisé (10.28) sur  $\omega_0$ , nous recevrons la chute statique de la vitesse en unités relatives :

$$\Delta\omega^* = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Si dans la chaîne de l'induit du moteur on insère une résistance (rhéostat) supplémentaire, les caractéristiques mécaniques obtenues dans ce cas s'appellent les **caractéristiques artificielles** ou **rhéostatique**. Ces caractéristiques se croisent tout dans un point  $\omega_0$ . Les caractéristiques rhéostatiques sont aussi linéaires, comme la caractéristique naturelle, mais ils ont beaucoup plus de l'inclinaison vers l'axe des moments. Plus la valeur de la résistance du rhéostat, introduit dans la chaîne de l'induit, moins la pente de cette caractéristique.

De l'équation de l'équilibre électrique de la chaîne de l'induit du moteur (10.19) il vient qu'au moment de la mise en marche à  $\omega = 0$ , la f.é.m. de la rotation  $E = 0$ , et le courant de mise en marche du moteur est à 10–30 fois supérieure de la valeur nominale. C'est pourquoi la mise en marche directe du moteur, i.e. le branchement direct de l'induit sur la tension du réseau, est inadmissible. Pour limiter la valeur du courant de mise en marche de l'induit, avant de le mettre en marche, on branche en série de l'induit un rhéostat de mise en marche  $R_{m.m}$  avec une petite résistance.

**10.9.2 Moteur à l'excitation série.** Le bobinage d'excitation est relié en série à l'induit (voir la figure 10.18), et c'est pourquoi le courant dans la charge est le courant de l'induit et le courant inducteur ( $I = I_{\text{induit}} = I_{\text{exc}}$ ). Cela influe de manière significative sur les propriétés et les caractéristiques du moteur, puisque le changement du moment de la charge est accompagné inévitablement par le changement du flux magnétique du stator.



**Figure 10.18** – Schema de couplage du moteur à l'excitation série

Pour un électromoteur à l'excitation série l'équation de la caractéristique électromécanique, ainsi que pour un moteur de l'excitation indépendante, est :

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi}, \quad (10.30)$$

où  $R = R_{\text{induit}} + R_{\text{exc}} + R_R$ .

À la différence du moteur à excitation indépendante ici le flux magnétique  $\Phi$  est la fonction du courant de l'induit  $I$ . Cette dépendance (voir la figure 10.19) est appelé courbe de magnétisation. Puisqu'il n'y a pas d'expression exacte analytique pour la courbe de magnétisation, il est difficile de donner l'expression exacte analytique pour la caractéristique mécanique d'un moteur à l'excitation série. Si l'on suppose la relation linéaire entre le flux et le courant de l'induit, c'est-à-dire de considérer que  $\Phi = \alpha \cdot I$ , on peut exprimer le couple du moteur comme il suit

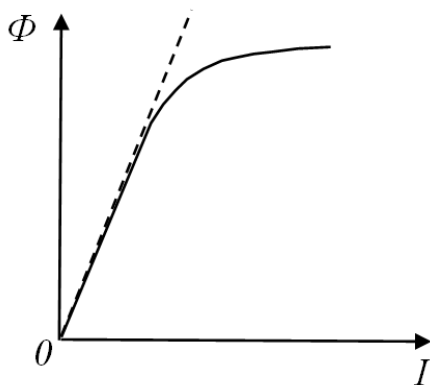
$$M = k \cdot \Phi \cdot I = \alpha \cdot k \cdot I^2. \quad (10.31)$$

En remplaçant dans (10.30), la valeur de courant de (10.31), nous obtenons l'expression de la caractéristique mécanique:

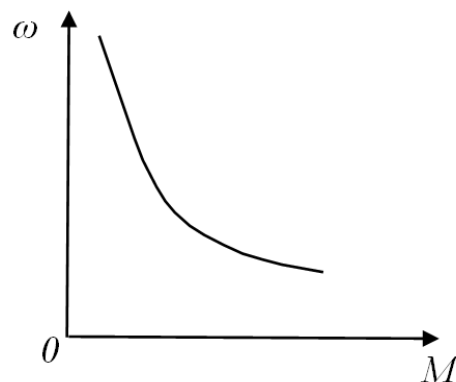
$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{\frac{M}{\alpha k}}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B. \quad (10.32)$$

Il faut d'ici que pour la chaîne magnétique insaturée du moteur la caractéristique mécanique est représentée par la courbe (fig. 10.20), dont l'axe des ordonnées est l'asymptote. La particularité de la caractéristique mécanique du moteur à excitation série est sa grande pente dans le domaine des petites valeurs du moment. L'augmentation considérable de la vitesse angulaire lors des petites charges est provoquée par la réduction correspondante du flux magnétique.

L'équation (10.32) donne seulement la représentation générale sur la caractéristique mécanique du moteur d'excitation série. Dans les calculs on ne peut pas utiliser cette équation, puisque les machines au système insaturé magnétique ne construisent pas, puisque les caractéristiques valables mécaniques se distinguent fortement de la courbe exprimée par l'équation (10.32). On fait la construction des caractéristiques par les moyens grapho-analytiques.



**Figure 10.19** – Courbe de magnétisation du moteur à l'excitation série

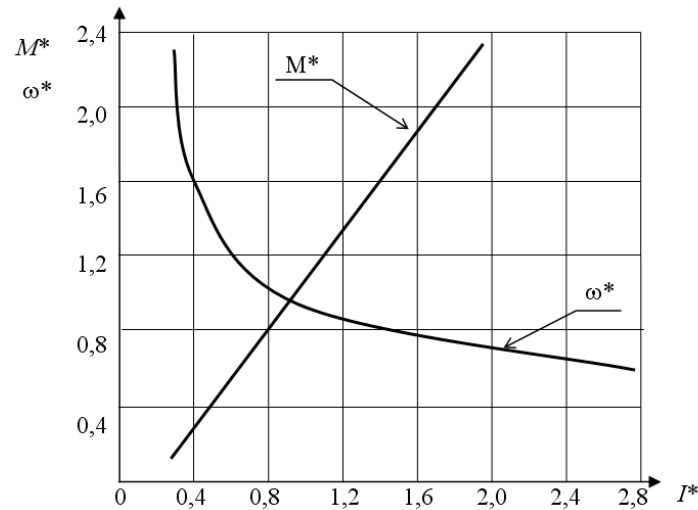


**Figure 10.20** – Caractéristique mécanique naturelle du moteur à l'excitation série

Habituellement, la construction des caractéristiques artificielles se fait sur la base de données des catalogues, où on amène les caractéristiques naturelles  $\omega = f(I)$  et  $M = f(I)$ . Pour une série des moteurs d'un type défini ces

caractéristiques sont donnés en unités relatives  $\omega^* = f(I^*)$  и  $M^* = f(I^*)$ . Telles caractéristiques universelles sont montrées sur la figure 10.21.

Dans les catalogues on donne aussi la dépendance du couple sur l'arbre du moteur de courant. À la construction des caractéristiques mécaniques on accepte d'utiliser la dépendance de la vitesse angulaire du couple électromagnétique. C'est pratiquement admissible en raison d'une petite différence entre le couple électromagnétique et le couple sur l'arbre.



**Figure 10.21** – Dépendance du couple et de la vitesse angulaire de courant de l'induit d'un moteur à l'excitation série

On peut obtenir les caractéristiques artificielles par la voie suivante. De (10.30) à  $R_R = 0$  nous recevons l'équation de la caractéristique naturelle :

$$\omega_{\text{naturelle}} = \frac{U - I \cdot R_{\text{machine}}}{k \cdot \Phi},$$

où  $R_{\text{machine}} = R_{\text{induit}} + R_{\text{exc}}$  et nous l'inscrivons comme il suit

$$\omega_{\text{naturelle}} = \frac{U}{k \cdot \Phi} \left( 1 - \frac{I \cdot R_{\text{machine}}}{U} \right). \quad (10.33)$$

Lors de branchement à la chaîne de l'induit du moteur de la résistance supplémentaire  $R_R$ , le moteur travaillera sur une caractéristique rhéostatique, pour laquelle

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} \left( 1 - \frac{I(R_{\text{machine}} + R_R)}{U} \right). \quad (10.34)$$

Ayant divisé (10.34) sur (10.33) nous recevons :

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{naturelle}}} = \frac{U - I(R_{\text{machine}} + R_R)}{U - I \cdot R_{\text{machine}}},$$

d'où

$$\omega = \omega_{\text{naturelle}} \frac{U - I(R_{\text{machine}} + R_R)}{U - I \cdot R_{\text{machine}}}. \quad (10.35)$$

Ou dans les unités relative



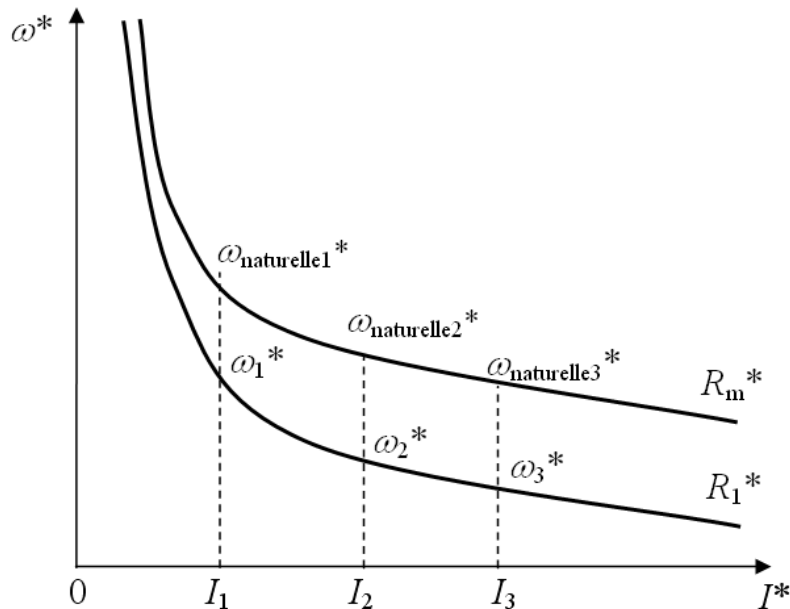
$$\omega^* = \omega_{\text{naturelle}}^* \frac{1 - I^* \cdot R^*}{1 - I^* \cdot R_m^*}, \quad (10.36)$$

où  $R^* = \frac{R_{\text{machine}} + R_R}{R_{\text{nom}}}$  – résistance totale de la chaîne de l'induit dans les unités relatives,

$$R_m^* = \frac{R_m}{R_{\text{nom}}}, \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{nom}}}, \quad \omega_{\text{naturelle}}^* = \frac{\omega_{\text{naturelle}}}{\omega_{\text{nom}}}, \quad I^* = \frac{I}{I_{\text{nom}}}.$$

L'ordre de la construction de la caractéristique rhéostatique est le suivant : en choisissant certaines significations arbitraires du courant  $I_1^*$  et se servant la caractéristique naturelle on trouve  $\omega_{\text{naturelle1}}^*$ . Puis selon (10.36), ayant  $R^* = R_1^*$ , dont on construit une caractéristique rhéostatique, et pour même  $I_1^*$  on définit la signification cherchée  $\omega_1^*$ . De la même manière pour d'autres significations  $I^*$  on définit les significations cherchées de la vitesse  $\omega_2^*$ ,  $\omega_3^*$ , etc. La figure 10.22 montre les caractéristiques du moteur à l'excitation série – naturelle  $R_m^*$  et rhéostatique  $R_1^*$ . Avec l'augmentation de la résistance de la chaîne de l'induit la vitesse du moteur au même couple diminue, et la caractéristique se déplace en bas. La rigidité de la caractéristique diminue avec la croissance de la résistance supplémentaire dans la chaîne de l'induit. La particularité des caractéristiques mécaniques du moteur examiné est l'impossibilité d'obtenir un régime de la marche à vide idéale.

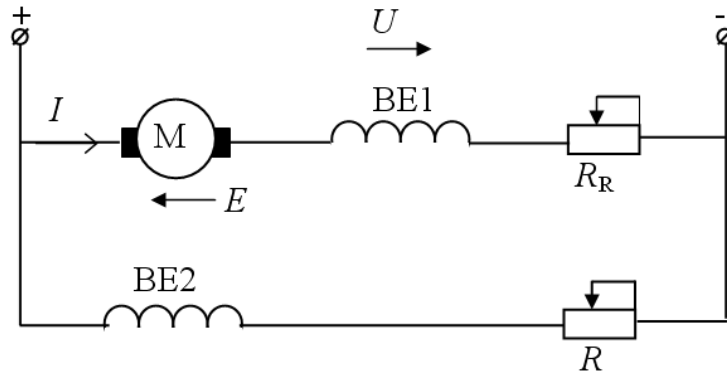
Lorsque la charge est inférieur à 15–20 % de la valeur nominale le travail du moteur est presque impossible à cause d'une augmentation de la vitesse de l'induit.



**Figure 10.22** – Caractéristiques électromécaniques du moteur à l'excitation série

Les moteurs à l'excitation série sont largement utilisés dans les installations de levage (moteurs de grue) et dans les voitures électriques (moteurs de traction), où on a le besoin d'un grand couple (surtout au démarrage).

**10.9.4 Moteur à l'excitation composée** (fig. 10.23) a deux bobinages d'excitation : de type séparée (indépendante) BE2 et de type série BE1, de sorte que ses caractéristiques mécaniques occupent une position intermédiaire entre les caractéristiques des moteurs à l'excitation séparée et à l'excitation série. La caractéristique mécanique du moteur examiné en conséquence du changement du flux magnétique en fonction de la charge n'a pas de l'expression analytique, c'est pourquoi lors du calcul on utilise généralement des caractéristiques naturelles universelles du moment et de la vitesse du courant de l'induit, qui sont donnés dans les catalogues. Telles caractéristiques dans les unités relatives sont présentées sur la figure 10.24.

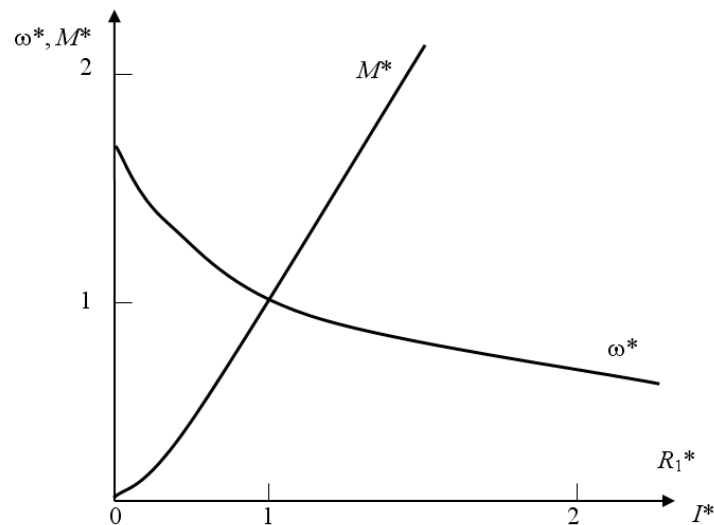


**Figure 10.23** – Schema de couplage du moteur à l'excitation composée

À la différence du moteur à l'excitation série d'un moteur à l'excitation composée a la valeur finale de la vitesse de la marche à vide idéale. Cette vitesse est définie seulement par le flux de force magnétique créé par la force magnétomotrice du bobinage indépendant, et est égale à

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_0},$$

où  $\Phi_0$  – flux magnétique créé par le courant d'excitation du bobinage indépendant.



**Figure 10.24** – Dépendance du couple et de la vitesse angulaire de courant de l'induit du moteur à l'excitation composée

Les rapports des forces magnétomotrices des bobinages indépendant et série sont divers pour les moteurs de types différentes. Le plus utilisé est le rapport, qui au courant nominal donne l'égalité des forces magnétomotrices des deux bobinages de l'excitation. La vitesse du moteur à l'excitation composée lors de petites charges change considérablement, puis lors de l'augmentation de la charge diminue lentement presque en ligne droite, comme pour le moteur de l'excitation indépendante. Cela est dû au fait qu'à des grandes charges vient la saturation de la machine. Et bien que la force magnétomotrice du bobinage successif augmente, le flux de force magnétique déjà presque ne change pas.

Pour calculer les caractéristiques rhéostatiques on peut appliquer l'ordre examiné plus haut de la construction des caractéristiques du moteur de l'excitation série.

### **Conclusions principales**

1. Machine électrique à courant continu peut fonctionner en mode générateur et en mode moteur. Dans une génératrice à courant continu se produit la conversion de l'énergie mécanique, l'énergie d'un moteur d'entraînement, en énergie électrique. Dans un moteur électrique à courant continu s'effectue la conversion de l'énergie électrique en un mouvement rotatif de l'induit du moteur électrique.

2. La réaction d'induit se manifeste dans la distorsion du flux magnétique, principal, à la suite de quoi diminue la f.é.m. des génératrices et diminue le moment électromagnétique des moteurs.

3. Les pôles supplémentaires créent dans la zone de la commutation le champ magnétique, qui dirige à la rencontre du champ de l'induit et empêche l'apparition d'étincelage d'induit.

4. Le collecteur est utilisé pour redresser le courant alternatif d'induit dans la chaîne extérieure des génératrices et pour changer la direction du courant dans les conducteurs de la bobine d'induit lors de sa rotation.

5. Les principales caractéristiques des machines à courant continu sont : pour les génératrices – la caractéristique extérieure  $U = f(I_{\text{induit}})$ , pour les moteurs – les caractéristiques de vitesse  $\omega = f(I_{\text{induit}})$  et mécanique  $\omega = f(M)$ .

6. La f.é.m. du bobinage d'induit. de la MCC est définie par la construction de la machine, la vitesse de la rotation de l'induit et la valeur du flux de force magnétique créé par le système de l'excitation.

7. Dans les MCC à excitation séparée enroulement d'excitation est alimenté d'une source d'énergie électrique qui n'est pas lié avec les circuits d'induit de la machine.

8. Dans les machines à excitation dérivée le bobinage d'excitation est reliée en parallèle avec la chaîne de l'induit. En cas de nécessité on peut insérer le bobinage d'excitation de cette machine selon le schéma d'excitation indépendante.

9. Dans les machines à excitation série le bobinage d'excitation est relié successivement à la chaîne de l'induit. On fait ce bobinage d'une faible résistance (un petit nombre des spires de la grande section).

## Questions pour la maîtrise de soi

1. Quelles sont les parties principales de la machine à courant continu et quel est leur structure ?
2. Quelles propriétés des machines électriques à courant continu ont conditionné leur large application ?
3. Expliquez le principe de l'action d'une génératrice à courant continu ?
4. Quelle est la destination du collecteur d'une génératrice et d'un moteur ?
5. Comment peut-on changer la f.é.m. du bobinage d'induit de la génératrice ? De quels paramètres dépend-t-elle ?
6. Pourquoi dans une MCC apparaît la réaction de l'induit ? Expliquez son influence sur la valeur de la f.é.m. d'une MCC ?
7. Expliquer l'essence de la commutation des machines à courant continu.
8. Comment réduire les effets nocifs de la réaction d'induit sur le fonctionnement d'une MCC ?
9. Caractérisez les pertes de l'énergie dans une MCC accompagnant les procès de la transformation de l'énergie mécanique à électrique et vice versa.
10. Quelle est la classification des génératrices à courant continu selon la méthode de l'excitation ?
11. Quelles sont les particularités du générateur à l'excitation séparée ?
12. Expliquez la nature de la caractéristique extérieure et la possibilité du réglage de la tension des générateurs à l'excitation séparée.
13. Expliquez le principe et les conditions de l'autoexcitation des générateurs à courant continu.
14. Quelles sont les particularités de la caractéristique extérieure du générateur avec l'excitation dérivée ?
15. En quoi consistent les avantages et les inconvénients du générateur à l'excitation série ?
16. Dans quel but dans les machine à l'excitation série le bobinage d'excitation accomplissent par le fil de la grande section avec un petit nombre de spires et une petite résistance ?
17. Quelle nature a la caractéristique extérieure du générateur à l'excitation composée lors de la connexion des bobinages de l'excitation coordonnée et en opposition ?
18. Quel est le rôle de rhéostat de démarrage et comment on choisit la valeur de sa résistance ?
19. Quelles sont les particularités du moteur à l'excitation dérivée ?
20. Comment on fait la régulation de vitesse du moteur par le changement du courant d'excitation. Pourquoi une rupture de la chaîne d'excitation est dangereux pour le moteur ?
21. Comment change la vitesse du moteur au changement de la charge sur son arbre ? Pourquoi le travail avec une petite charge est inadmissible au moteur ?
22. Comment on réalise le réglage de la vitesse d'un moteur à l'excitation série ?
23. Comment changent le couple et la vitesse du moteur à l'excitation composée lors de l'augmentation de la charge ?
24. Quel des pertes dans la MCC dépendent-ils de la charge ? Quelles pertes sont constantes ?

## Chapitre 11 :

### MOTEURS ÉLECTRIQUES ASYNCHRONES

**Notions clés :** stator,  $m$  ; rotor,  $m$  ; champ magnétique tournant,  $m$  ; glissement,  $m$  ; moteur asynchrone (à induction),  $m$  ; mode (régime) de fonctionnement, (en génératrice, moteur, amarrage),  $m$  ; rapport de transformation,  $m$  ; équilibre électrique du stator (du rotor),  $m$  ; schéma équivalent du moteur asynchrone,  $m$  ; diagramme vectoriel du moteur asynchrone,  $m$  ; caractéristique à vide (mécanique, de vitesse),  $f$ .

Les machines asynchrones (MAS) sont utilisés principalement en tant que les moteurs. D'après les estimations des experts les moteurs asynchrones font 90–95 % du nombre total des moteurs électriques se trouvant dans l'exploitation. La simplicité, une haute fiabilité dans le travail, de petits gabarits et le coût bas les moteurs asynchrones triphasés d'une capacité plus de 0,5 kW ont conditionné leur large utilisation dans la commande électrique des machines-outils, dans les mécanismes de levage et de transport, des pompes, des ventilateurs, des compresseurs et al.

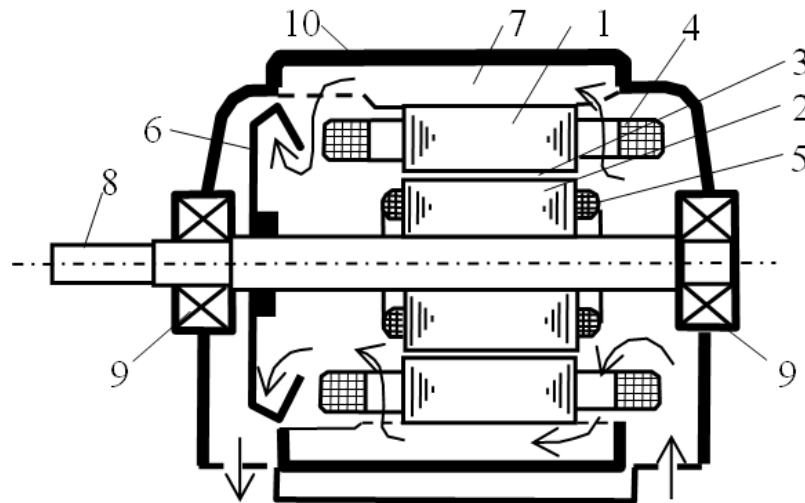
Les moteurs asynchrones de puissance jusqu'à 0,5 kW sont accomplis à une et à deux phases. Ils sont utilisés dans des systèmes d'automatisation, dans les appareils électroménagers, dans l'outil électrique et al.

#### 11.1 Construction et principes de fonctionnement d'une machine asynchrone triphasée

**11.1.1 Construction d'une machine asynchrone.** Une machine asynchrone (on dit encore – machine à induction), comme n'importe quelle machine électrique, est réversible et peut fonctionner en régimes moteurs et génératrices. Dans la majorité des cas les MAS sont utilisées à titre des moteurs.

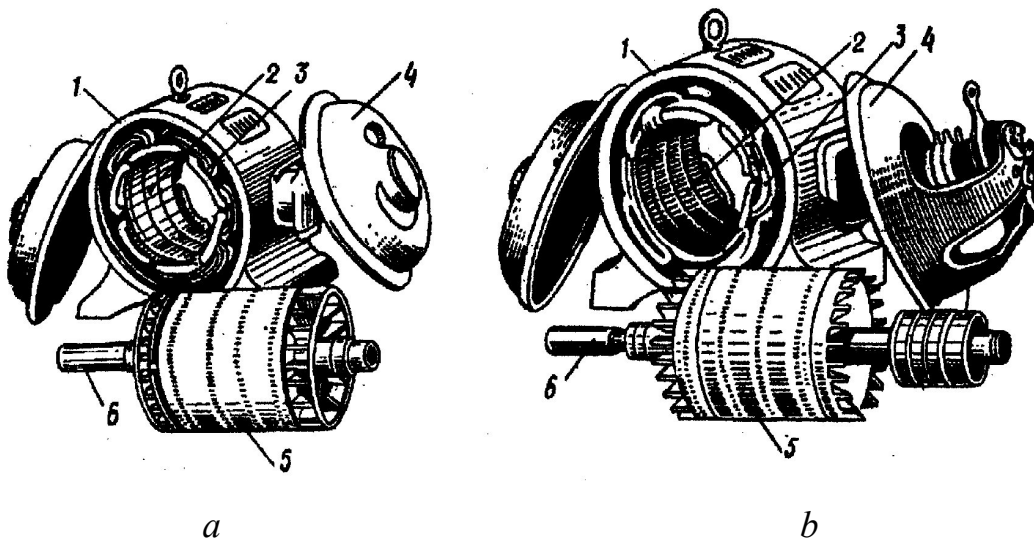
Les principaux composants du moteur asynchrone sont le stator immobile et le rotor (voir les figures 11.1 et 11.2). Entre le stator et le rotor il y a un entrefer. Le stator comprend (fig. 11.2) un bâti 1, qui est la fois le corps du moteur, un circuit magnétique 2 et les bobinages 3.

Le noyau magnétique du stator, qui représente la majeure partie de circuit magnétique de la machine, est formé des feuilles estampées isolées l'un de l'autre de l'acier électrotechnique de l'épaisseur de 0,35–0,5 mm. Sur la surface cylindrique intérieure du circuit magnétique il y a des encoches dans lesquelles entrent les conducteurs du bobinage de stator. Des deux côtés de bâti sont fixés deux flasques latéraux 4, dont les orifices dans le centre retiennent les roulements de l'arbre du rotor.



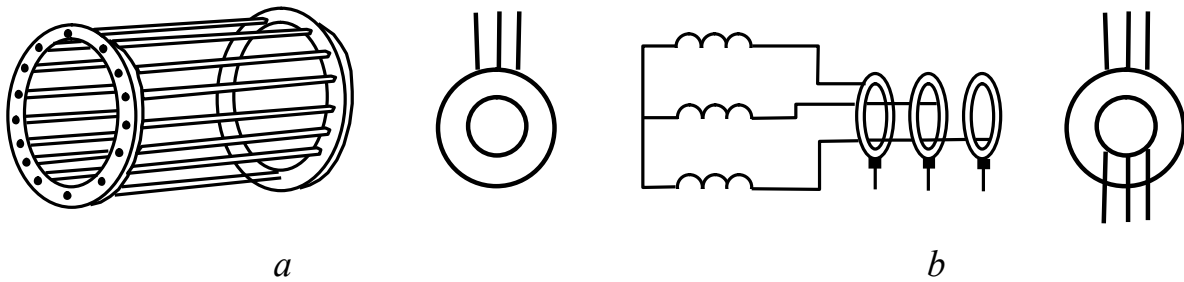
**Figure 11.1** – Construction d'un moteur asynchrone : 1 – noyau statorique ; 2 – noyau de rotor ; 3 – entrefer ; 4 – bobinage du stator ; 5 – bobinage du rotor ; 6 – ventilateur ; 7 – les canaux de ventilation (les flèches montrent la direction du mouvement de l'air refroidissant par les canaux) ; 8 – arbre ; 9 – roulements ; 10 – bâti

Le rotor du moteur asynchrone 5 (fig. 11.2) se compose d'un paquet du noyau magnétique, composé des feuilles estampées de l'acier électrotechnique, et d'un bobinage. Planté sur l'arbre 6 paquet magnétique a la forme du cylindre, sur la surface extérieure duquel on accomplit les rainures, auxquelles s'installe un bobinage.



**Figure 11.2** – Eléments constructifs du moteur à induction :  
a – à rotor à cage d'écureuil ; b – à rotor bobiné

En fonction du type du bobinage le rotor d'un moteur asynchrone peut être en court-circuit ou à bagues collectrices. Aux rainures des rotors en court-circuit on met les barreaux de cuivre dont les extrémités sont liés par anneaux. Un tel bobinage ressemble au « cage d'écureuil » (fig. 11.3, a). La désignation graphique du moteur asynchrone au rotor en court-circuit est donnée sur la figure 11.3, a.



**Figure 11.3** – Bobinages du rotor d'un moteur asynchrone :  
*a* – en court-circuit ; *b* – à bagues

Dans les rainures du rotor à bagues sont placés les fils des sections du bobinage triphasé, généralement jointe à l'étoile (fig. 11.3, *b*). Les bornes libres des phases de l'enroulement du rotor (notée P1, P2, P3) sont associés à trois (selon le nombre de phases) isolés les uns des autres anneaux de contact. Sur les anneaux sont imposés les balais, à l'aide duquel le circuit du bobinage tournant du rotor se connecte avec un rhéostat régulateur ou de mise en marche. Symboles graphiques du moteur asynchrone à bagues est donnée sur la figure 11.3, *b*.

**11.1.2 Principe de fonctionnement d'une MAS** est basé sur l'utilisation du champ magnétique tournant. Lorsque il y a une connexion au réseau triphasé le bobinage de stator crée un champ magnétique tournant, dont la vitesse angulaire est définie par la fréquence du réseau  $f$  et le nombre de paires de pôles  $p$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \text{ rad/s.}$$

En traversant les conducteurs du bobinage du stator et du rotor, ce champ en vertu de la loi de l'induction électromagnétique induit dans les bobinages de la f.é.m. Dans le circuit fermé du bobinage de rotor circule un courant qui, à la suite d'une interaction avec un champ magnétique, crée sur l'arbre un couple électromagnétique. Si ce couple dépasse le moment de résistance à l'arbre du moteur, l'arbre commence à tourner et met en marche le mécanisme ouvrier. Habituellement, la vitesse angulaire du rotor  $\omega_2$  n'est pas égale à la vitesse angulaire du champ magnétique  $\omega_1$ , dite synchrone. D'où le nom de moteur – asynchrone, c'est-à-dire n'est pas synchrone.

Le fonctionnement d'une MAS est caractérisée par le **glissement  $g$** , qui représente la **différence relative des vitesses angulaires du champ  $\omega_1$  et du rotor  $\omega_2$**  :

$$g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} . \quad (11.1)$$

La valeur et le signe du glissement, dépendent de la vitesse angulaire du rotor par rapport au champ magnétique et déterminent le mode de fonctionnement de la machine asynchrone. Ainsi, dans le mode de court-circuit idéal le rotor et le champ magnétique tournent avec la même fréquence dans la même direction, c'est-à-dire le rotor est immobile en ce qui concerne le champ magnétique tournant, et le glissement  $g$  est égale à zéro. La f.é.m. dans le bobinage du rotor n'est pas

induite, le courant de rotor et le couple électromagnétique de la machine sont égaux à zéro. À la mise en marche au premier moment du temps le rotor est immobile :  $\omega_2 = 0$ ,  $g = 1$ . Donc, le glissement en mode moteur change de  $g = 1$ , lors du démarrage jusqu'à  $g = 0$  dans le mode de court-circuit idéal.

Lors de la rotation du rotor avec la vitesse  $\omega_2 > \omega_1$  dans le sens de rotation du champ magnétique le glissement devient négatif. La machine passe au régime générateur et développe un couple de freinage. Lors de la rotation du rotor dans le sens opposé à la rotation du champ magnétique ( $g > 1$ ), la machine asynchrone passe en mode de freinage (l'opposition de démarrage) et développe aussi un couple de freinage. Ainsi, en fonction du glissement on distingue les **modes** : **moteur** ( $g = 1 \div 0$ ), **en génératrice** ( $g = 0 \div -\infty$ ) et **de freinage** ( $g = 1 \div +\infty$ ). Modes en génératrice et de freinage on utilise pour le freinage des moteur asynchrone.

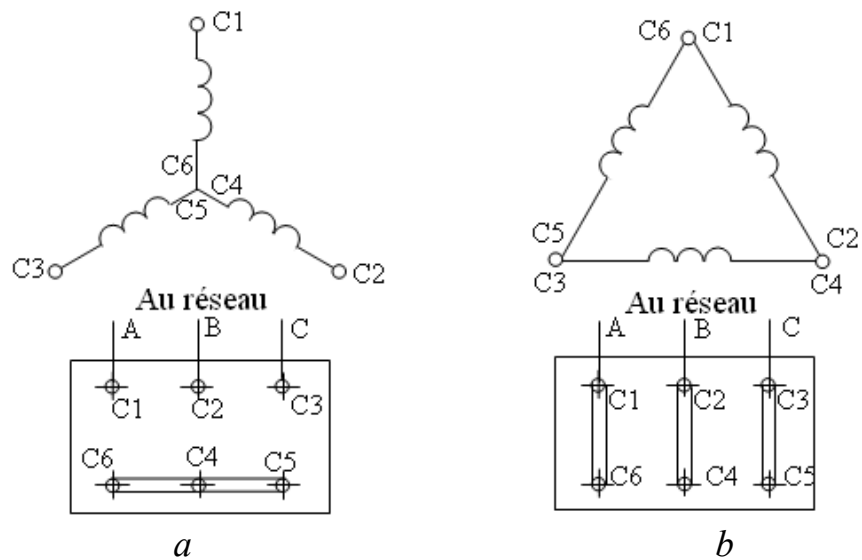
Les moteur asynchrone moderne, en fonction de leur type, à la charge nominale ont le glissement  $g_{\text{nom}} = 0,015 \div 0,07$ .

**11.1.3 Couplage des enroulements du stator.** Le début des enroulements sont indiqués par C1, C2, C3; la fin – C4, C5, C6. Pour connecter le moteur dans un réseau on branche les enroulements du stator en étoile ou en triangle. Question sur le schéma de connexion est résolu en fonction de la tension composée du réseau et la tension nominale des enroulements du stator. Des informations à ce sujet figurent sur la plaque du moteur. Lorsque le schéma de connexion est en étoile (voir la figure 11.4, *a*) les trois extrémités des enroulements de phase C4, C5, C6 se lient au point nul, lorsque le schéma de connexion est en triangle (fig. 11.4, *b*) ils sont reliés entre eux par paires les débuts et les fins des phases voisines:

C1 - C6, C2 - C4, C3 - C5. On connecte le réseau dans le premier cas à trois débuts C1, C2, C3, dans le second - aux points communes C1 - C6, C2 - C4, C3 - C5.

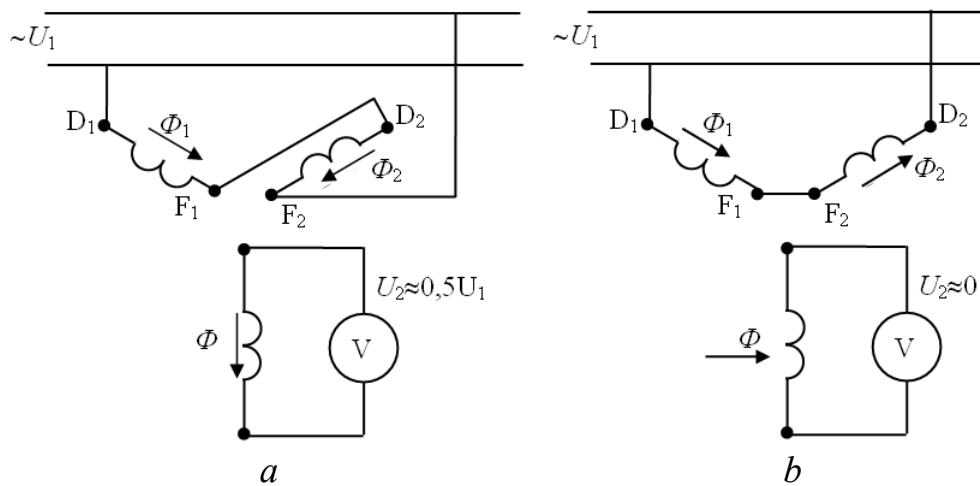
Les notions « le début » et « la fin » des bobinages de la phase sont conventionnelles, mais elles sont nécessaires pour la bonne connexion des bobinages dans un schéma. Pour l'un des bobinages de la phase, on peut arbitrairement choisir son début (C1), mais après cela, pour le début des deux autres bobinages il convient de prendre de telles leurs bornes, allant de qui les bobinages sont enroulés dans le même sens que le bobinage premier. Pour un moteur assemblé établir l'homonymie des bornes pratiquement impossible. En l'absence des désignations des bornes du stator pour leur marquage on peut effectuer les mesures suivantes. Si les deux bobinages du stator relier successivement, il y a deux variantes de couplage : d'accord, quand on joint le début et la fin (fig. 11.5, *a*), et en opposition, quand les bobinages sont joints par les fins ou par les débuts (fig. 11.5, *b*). Le flux de force magnétique résultant des deux bobinages  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$  sera différemment orienté en ce qui concerne le troisième bobinage. Dans le premier cas elle sera pénétrée par le flux résultant, qui induit en elle de la f.é.m. Le voltmètre sur ses bornes mesurera la tension  $U_2$  égal environ à la moitié de la tension réduite  $U_1$ . Dans le second cas le flux résultant se renfermera dans le plan du troisième bobinage – le voltmètre indiquera zéro volt.





**Figure 11.4** – Couplage des enroulements du stator :  
*a* – en étoile ; *b* – en triangle

Ainsi, selon les déclarations du voltmètre on établit les bornes homonymes des deux premiers bobinages. Après le marquage on remplace un des bobinages par troisième bobinage et l'expérience se répète pour la définition des bornes homonymes du troisième bobinage. À la tenue de l'expérience il faut se servir de la tension baissée ( $U \approx 0,3 \cdot U_{\text{nom}}$ ).



**Figure 11.5** – Schéma de définition des débuts et des fins des bobinages du stator

## 11.2 F.é.m. du stator et du rotor

Le champ magnétique tournant induit dans chacun des bobinages du stator et du rotor une f.é.m. variable. Grâce à la distribution de chaque bobinage dans les rainures on assure une forme pratiquement sinusoïdale des courbes de la f.é.m. dans les bobinages, mais à la suite les f.é.m. des sections séparées du bobinage ont les phases diverses et il est nécessaire de les mettre

vectorellement. C'est pourquoi la f.é.m. totale d'un bobinage de phases est moins que de la somme d'arithmétique de la f.é.m. des sections séparées. Pour tenir compte de cette circonstance dans l'expression de la f.é.m. du moteur on introduit le coefficient de bobinage  $k$ , qui est accepté plus petit ou égal à l'unité. Ainsi, la f.é.m. du bobinage de la phases du stator est définie par la formule

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi, \quad (11.2)$$

où :

$f_1$  – fréquence du courant statorique ;

$w_1$  – nombre de tours du bobinage de phase ;

$k_1$  – coefficient de bobinage  $k$  du stator ( $k_1 = 0,9 \div 0,95$ ) ;

$\Phi$  – flux magnétique du champ tournant.

Une expression similaire définit la f.é.m. de la phase du rotor

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi, \quad (11.3)$$

où :

$f_2$  – fréquence du courant statorique ;

$w_2$  – nombre de tours du bobinage de phase du rotor ;

$k_2$  – coefficient de bobinage  $k$  du rotor, en cas du rotor court-circuit  $k_2 = 1$ .

Le champ magnétique, en tournant dans l'espace à la vitesse synchrone  $n_1$ , relativement au rotor tournant a une vitesse

$$n_g = n_1 - n_2. \quad (11.4)$$

Pour chaque cycle de rotation du champ relativement au rotor phase de sa f.é.m. change sur  $p \cdot 360$  degrés électriques, ce qui correspond aux  $p$  périodes complètes de la f.é.m. Le nombre de périodes par seconde, c'est-à-dire la fréquence de la f.é.m. du rotor, dans ce cas est égale à

$$f_2 = \frac{n_g \cdot p}{60} \quad \text{ou} \quad f_2 = f_1 \cdot g, \quad (11.5)$$

i.e. la fréquence de la f.é.m. du rotor, et, par conséquent, la valeur de la f.é.m.  $E_2$  (11.3) sont proportionnels au glissement. La fréquence de la f.é.m. du rotor sera le plus grand au moment initial du démarrage, quand  $g = 1$ . De plus, elle est égale à la fréquence du réseau d'alimentation  $f_1$ . Avec la dispersion du moteur diminue le glissement et diminue la fréquence du courant du rotor. En régime de fonctionnement du moteur, alimenté par un courant de la fréquence  $f_1 = 50$  Hz, la fréquence du courant du rotor fait 1–2 Hz. À  $g = 1$ ,  $f_2 = f_1$ , alors la f.é.m. du rotor immobile s'exprime par

$$E_{2.\text{imm}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi. \quad (11.6)$$

En substituant  $E_{2.\text{imm}}$  dans la formule (11.3), nous recevrons la f.é.m. du rotor tournant

$$E_2 = E_{2.\text{imm}} \cdot g. \quad (11.7)$$

Ainsi, la f.é.m.  $E_2$ , comme sa fréquence, diminue avec l'accélération du rotor. La relation de la f.é.m. du stator  $E_1$  (11.2) vers la f.é.m. du rotor immobile

$E_{2,imm}$  (11.6) est appelé le **rapport de transformation de la f.é.m. du moteur asynchrone**, qui est égal

$$k_e = \frac{E_1}{E_{2,imm}} = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2}. \quad (11.8)$$

La f.é.m. du stator  $E_1$  et du rotor  $E_2$  sont créés par un flux tournant principal. Ce flux se renferme par l'entrefer entre le stator et le rotor. En dehors d'un flux principal, **chaque bobinage crée un flux, s'attachant seulement à elle-même**. Ce flux est appelé **flux de dispersion**. Le dernier se renferme dans les rainures, ainsi qu'autour des parties frontales des bobinages. Étant donné que les flux de **dispersion** passent principalement en air, ils peuvent être considérés comme proportionnelle aux courants dans les bobinages. Les flux de dispersion induisent dans les bobinages du stator et du rotor la f.é.m. de la dispersion  $E_{disp.1}$  et  $E_{disp.2}$ . Ces f.é.m. peuvent être considérés comme des chutes de tension inductive dans les bobinages :

$$E_{disp.1} = -I_1 \cdot X_1 = -I_1 \cdot \omega_1 \cdot L_1 ; \quad (11.9)$$

$$E_{disp.2} = -I_2 \cdot X_2 = -I_2 \cdot \omega_2 \cdot L_2 , \quad (11.10)$$

où :

$I_1$  et  $I_2$  – les courants du stator et du rotor ;

$X_1$  et  $X_2$  – les résistances inductives du bobinage de stator et de rotor ;

$L_1$  et  $L_2$  – les inductances de fuite.

Puisque nous pensons que la dépendance entre les flux de fuite et les courants, leurs créant, est proportionnelle, on peut compter que les inductances de fuite de  $L_1$  et  $L_2$  sont des valeurs constantes. Ils dépendent des caractéristiques de conception des bobinages, de la forme des rainures du stator et du rotor. Car la fréquence du rotor n'est pas constante et dépend du glissement, la résistance inductive du rotor aussi dépend de glissement

$$X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot g,$$

ou

$$X_2 = X_{2,imm} \cdot g , \quad (11.11)$$

où  $X_{2,imm} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2$  – la résistance inductive du bobinage du rotor immobile (à  $g=1$ ).

### 11.3 Equations de l'équilibre électrique du stator et du rotor

La f.é.m. de chaque bobinage de phase du stator est équilibrée par une tension du réseau  $U_1$ . En outre, la tension du réseau se couvre la chute de potentiel sur la résistance active du bobinage du stator  $R_1$ , créé par le courant du stator  $I_1$  et qui est égal  $I_1 \cdot R_1$ . En vertu de cela on peut inscrire l'équation des tensions ou, autrement dit, **l'équation de l'équilibre électrique du stator** :

$$\overline{U}_1 + \overline{E}_1 + \overline{E}_{fuite1} - \overline{I}_1 \cdot R_1 = 0 ,$$

ou 
$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{\text{fuite1}} + \bar{I}_1 \cdot R_1 = 0. \quad (11.12)$$

La f.é.m.  $E_1$  est en retard de phase sur le flux tournant au quart de la période ou sur l'angle  $90^\circ$ . La f.é.m. de fuite  $E_{\text{fuite1}}$  est en retard sur l'angle  $90^\circ$  sur le courant  $I_1$ . La chute de tension  $I_1 \cdot R_1$  coïncide en phase sur le courant.

Puisque  $E_{\text{fuite1}} = I_1 \cdot X_1$ , alors

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1 + \bar{I}_1 \cdot X_1, \quad (11.13)$$

ou 
$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot Z_1, \quad (11.14)$$

où  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$  est l'impédance de phase du stator.

Sous la forme complexe l'équation de l'équilibre électrique du stator

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1. \quad (11.15)$$

Puisque la résistance des bobinages de phase du stator  $Z_1$  est généralement faible, on peut négliger la chute de tension  $I_1 \cdot Z_1$ , alors

$$U_1 \approx E_1 \equiv \Phi. \quad (11.16)$$

Par conséquent, lorsque la tension du réseau est constante le flux de force magnétique tournant est constant, indépendant de la charge. Cela est vrai pour de petites valeurs des courants du stator.

Le flux de force magnétique tournant induit dans les phases du rotor de la f.é.m.  $E_2$ , qui provoque le courant  $I_2$ . Le courant du rotor crée le flux de la dispersion, la f.é.m. de fuite  $E_{\text{fuite2}} = -I_2 \cdot X_2$  et une chute de tension dans la résistance active du rotor  $I_2 \cdot R_2$ .

Par conséquent, l'équation de l'équilibre électrique du rotor

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{p2} = \bar{I}_2 \cdot R_2,$$

ou 
$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \bar{I}_2 \cdot X_2 = \bar{I}_2 \cdot Z_2, \quad (11.17)$$

où  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$  est l'impédance de phase du rotor.

Sous la forme complexe

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2. \quad (11.18)$$

Cette équation correspond à un diagramme vectoriel de rotor, représentée sur la figure 11.6. De l'équation (11.18) le courant du rotor est égale à

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (11.19)$$

Les valeurs  $E_2$  et  $X_2$  dépendent du glissement. En prenant en considération que  $E_2 = E_{2.\text{imm}} \cdot g$  et que  $X_2 = X_{2.\text{imm}} \cdot g$ , nous recevrons

$$I_2 = \frac{E_{2.\text{imm}} \cdot g}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot g^2}} = \frac{E_{2.\text{imm}}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + X_{2.\text{imm}}^2}}. \quad (11.20)$$

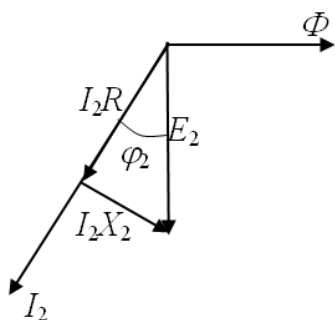
Dans cette formule la variable, dépendante de la charge, est le glissement  $g$ . La formule montre que le courant du rotor sera à son maximum au maximum du la glissement, c'est-à-dire au moment initial de la mise en marche du moteur lorsque  $g = 1$ . À la réduction du glissement le courant du rotor diminue.

Généralement  $R_2 < X_{2,imm}$ , donc le membre  $R_2/g$  sous la racine au dénominateur de la formule (11.20) a une influence importante sur la valeur du courant seulement à des petits glissements.

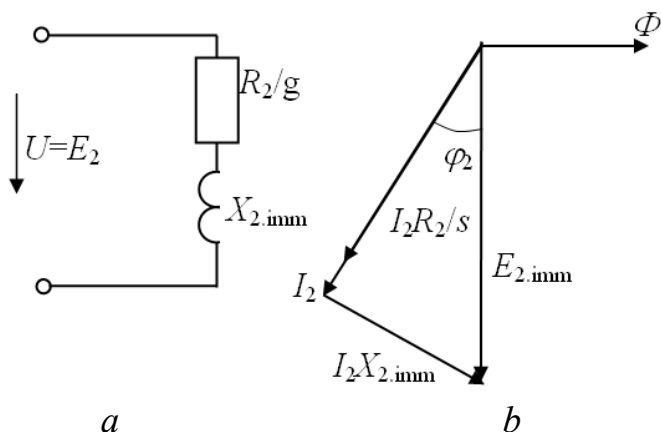
La phase du courant par rapport à la f.é.m.  $E_2$  dépend aussi du glissement

$$tg\psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_{2,imm} \cdot g}{R_2} . \quad (11.21)$$

À un petit glissement l'angle  $\psi_2$  est petit. En vertu de (11.20) la chaîne électrique du rotor on peut représenter par le schéma comprenant les résistances active  $R_2/g$  et inductive  $X_{2,imm}$  (au lieu des résistances réel  $R_2$  et  $X_2$ ), à laquelle est appliquée la tension  $U$  égal à la f.é.m. du rotor immobile  $E_{2,imm}$  (fig. 11.7, a). Le diagramme vectoriel d'un tel schéma du rotor est montré sur la figure 11.7. b.



**Figure 11.6** – Diagramme vectoriel selon l'équation (11.18)



**Figure 11.7** – Schéma de rotor (a) et diagramme vectoriel (b) lors des petits glissements

## 11.4 Equations des forces magnétisante et des courants

Le flux de force magnétique tournant du moteur en régime de fonctionnement est créé par l'action commune des forces magnétisantes du stator et du rotor, qui dépendent du nombre de phases, du nombre de spires, des valeurs des courants dans les bobinages, ainsi que de la distribution des bobinages par les rainures.

La force magnétisante du stator est proportionnelle à  $m_1 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_1$ , et du rotor – à  $m_2 \cdot I_2 \cdot w_2 \cdot k_2$ , où  $m_1$  – nombre des phases du stator,  $m_2$  – nombre des phases du rotor,  $k_1, k_2$  – les coefficients de correction.

La force magnétisante du stator tourne dans l'espace à la vitesse synchrone définie par la fréquence du courant d'alimentation et par nombre de paires des pôles  $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ . Le courant du rotor a la fréquence  $f_2$ . Sa force magnétisante

tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $n_g = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$ .

Le rotor lui-même tourne dans l'espace à la vitesse  $n_2$ . Donc, la force magnétisante du rotor tourne dans l'espace à la vitesse  $n_2 + n_g = n_1$ , i.e. à la vitesse synchrone.

Ainsi, les forces magnétisantes du stator et du rotor tournent dans l'espace à la vitesse identique synchrone. Par rapport de l'un à l'autre ils sont immobiles. Cette circonstance permet de les plier géométriquement, peu importe, le rotor est à l'arrêt ou en. La somme géométrique des forces magnétisantes du stator et du rotor détermine la force résultante magnétisante, qui crée le flux tournant en régime de fonctionnement. Elle est égale

$$m_1 \cdot \dot{I}_0 \cdot w_1 \cdot k_1 = m_1 \cdot \dot{I}_1 \cdot w_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot \dot{I}_2 \cdot w_2 \cdot k_2. \quad (11.22)$$

Cette équation est appelée *l'équation des forces magnétisantes du moteur asynchrone*.

En vertu de cet équation on peut diviser le courant du stator sur deux composantes

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}.$$

Ayant désigné

$$I_2 \frac{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1} = I_2 \cdot \frac{1}{k_i} = I_2', \quad (11.23)$$

$$\text{nous recevons} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'), \quad (11.24)$$

où :

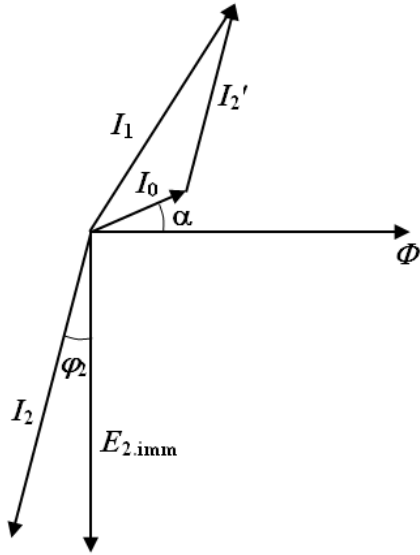
$I_0$  – courant magnétisant du stator ;

$I_2'$  – courant réduit du rotor, i.e. la partie du courant du stator, qui équilibre l'action démagnétisant du courant du rotor ;

$k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$  – rapport de transformation des courants du moteur asynchrone.

De l'équation (11.16) il vient que le flux de force magnétique tournant est déterminée principalement par la tension du réseau. Par conséquent, de la tension dépend aussi la composante magnétisante du courant statorique  $I_0$ . Si  $U_1 = \text{const}$ , le courant  $I_0 \approx \text{const}$ , c'est-à-dire on peut considérer que pratiquement le courant  $I_0$  ne dépend pas de la charge du moteur. Au changement de la charge sur l'arbre le courant statorique change en raison de sa composante  $-I_2'$ . Les phénomènes électromagnétiques, qui accompagnent le passage du moteur asynchrone d'une charge à l'autre, passent de la même manière, comme dans un transformateur lors de la modification de sa charge secondaire.

Selon l'équation (11.24) on peut construire le diagramme vectoriel des courants (fig. 11.8). Il est plus confortable de commencer sa construction par le vecteur du flux tournant  $\Phi$ . Le courant  $I_0$  en raison des pertes dans le circuit magnétique par courant de Foucault et par hystérésis est en avance par rapport au flux  $\Phi$  à l'angle des pertes  $\alpha$ . Au flux donné on établit le courant  $I_0$  et l'angle  $\alpha$



**Figure 11.8** – Diagramme vectoriel des courants

selon les caractéristiques du noyau magnétique. On peut définir la valeur et la phase de  $-\dot{I}_2'$  par la valeur et la phase du courant du rotor à l'aide des expressions (11.20), (11.21), (11.23).

La somme  $\dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$  donne le courant du stator. La part du courant magnétisant de  $-I_2'$  dans le courant du stator d'une machine asynchrone en comparaison de la part du courant de la marche à vide du transformateur dans le courant primaire est considérablement plus grande, puisque le noyau magnétique du moteur a un entrefer.

### 11.5 Schéma équivalent d'une machine asynchrone

Nous transformerons l'équation de la tension du rotor (11.18), en divisant ses deux parties sur le glissement

$$\frac{\dot{E}_2}{g} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{g} + \dot{I}_2 \cdot j \frac{X_2}{g} . \quad (11.25)$$

En prenant en considération que  $\frac{\dot{E}_2}{g} = \dot{E}_{2.imm}$  et  $\frac{X_2}{g} = X_{2.imm}$ , on peut inscrire

$$\dot{E}_{2.imm} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{g} + \dot{I}_2 \cdot j X_{2.imm} . \quad (11.26)$$

Considérant que  $I_2 = I_2' k_i$  (avec  $I_2'$  – le courant corrigé du rotor, i.e. la partie du courant du stator, qui équilibre l'action démagnétisant du courant de rotor ;  $k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$  – le rapport de transformation des courants du moteur à induction) et ayant multiplié (11.26) sur le rapport de transformation de la f.é.m.  $k_e$  (11.8), nous recevons

$$\dot{E}_{2.imm} \cdot k_e = \dot{I}_2' \frac{R_2 \cdot k_e \cdot k_i}{g} + \dot{I}_2' \cdot j x_{2.imm} \cdot k_e \cdot k_i ,$$

ou

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{R_2'}{g} + \dot{I}_2' \cdot j X_2' , \quad (11.27)$$

où :

$E_2' = E_{2.imm} \cdot k_e$  – f.é.m. du rotor immobile réduit au stator, qui est égale à la f.é.m. du stator  $E_1$  ;

$R'_2 = R_2 \cdot k = R_2 \cdot k_e \cdot k_i$  – résistance active du bobinage du rotor réduit au stator ;  
 $X'_2 = X_{2,imm} \cdot k = X_{2,imm} \cdot k_e \cdot k_i$  – résistance inductive réduit du rotor immobile ;  
 $k = k_e \cdot k_i = \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_1^2 \cdot k^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot k^2}$  – rapport de réduction des résistances du rotor au stator.

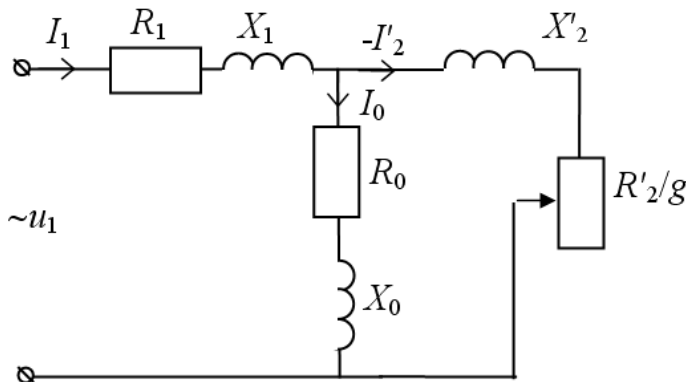
Un tel remplacement des valeurs réelles du rotor par les valeurs réduites ne change pas ses rapports énergétiques, mais permet de passer du lien électromagnétique entre les chaînes du rotor et le stator au lien électrique entre eux.

Au point de vue des équations des tensions du stator (11.14) et du rotor (11.27) et de l'équation des courants (11.24) un moteur asynchrone peut être présenté par un schéma équivalent montré sur la figure 11.9.

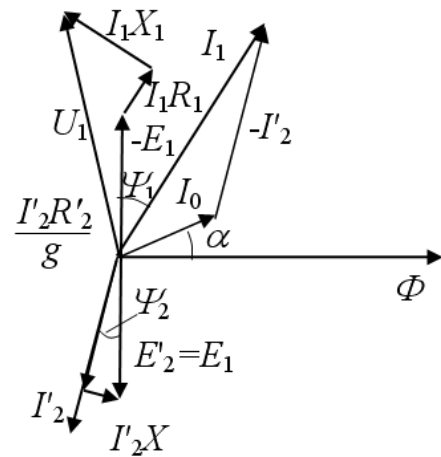
Ce schéma de substitution correspond au diagramme vectoriel du moteur asynchrone, qui est représentée sur la figure 11.10. Le schéma équivalent et le diagramme vectoriel satisfont aux équations indiquées des tensions et des courants. La branche de circuit avec le courant  $I_0$  est appelé **branche de magnétisation**. La résistance  $R_0$  et  $X_0$  sont déterminées par les propriétés magnétiques du noyau magnétique. La chute de tension, causée par le courant  $I_0$ , est égale et opposée à la phase de la f.é.m. du stator  $E_1$  et de la f.é.m. réduit de rotor  $E'_2$  :

$$\dot{I}_0 \cdot R_0 + \dot{I}_0 \cdot jX_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2 \quad (11.28)$$

Les paramètres du schéma équivalent peuvent être établis par un calcul ou à partir des données expérimentales. Pour les machines asynchrones, comme pour les transformateurs, on fait les essais en court-circuit et à vide.



**Figure 11.9** – Schéma équivalent d'un moteur asynchrone



**Figure 11.10** – Diagramme vectoriel d'un moteur asynchrone

## 11.6 Pertes et rendement du moteur asynchrone

Dans les moteurs asynchrone l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique. En train d'une telle transformation une partie de l'énergie se perd dans le moteur. La puissance  $P_1$ , consommée du réseau par le bobinage du stator, se dépense sur les pertes dans le stator et les pertes dans le rotor de l'électromoteur.



Les pertes dans le stator sont composées de perte de puissance dans le cardiaque du stator par l'hysteresis et par courants de Foucault (les pertes dans l'acier du stator)  $P_{\text{acier}}$  et la puissance des pertes électriques dans le bobinage du stator  $P_{\text{el.stator}}$  sur sa chauffage par le courant

$$P_{\text{el.stator}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (11.29)$$

où :

$m_1$  – nombre des phases du stator ;

$I_1$  – courant du stator ;

$R_1$  – résistance active de la phase du stator.

La partie restée s'appelle la **puissance électromagnétique du moteur**  $P_{\text{él.magn}}$ . C'est la puissance du champ tournant. Sa certaine partie fait les pertes électriques dans le rotor du moteur  $P_{\text{el.rotor}}$  :

$$P_{\text{el.rotor}} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (11.30)$$

où :

$m_2$  – nombre de phases du rotor ;

$I_2$  – courant du rotor ;

$R_2$  – résistance active de la phase du rotor.

Les moteurs avec les anneaux de contact ont  $m_2 = m_1$ . Les moteurs à cage d'écureuil ont le rotor polyphasé. Son nombre de phases est égal au nombre de tiges de la cage sur une paire des pôles. Si le nombre des rainures du rotor  $Z_2$ , alors le nombre de phases  $m_2 = Z_2/p$ . On peut négliger les pertes dans l'acier du rotor en conséquence d'une petite fréquence du courant du rotor. La partie restée de la puissance électromagnétique est convertie en puissance mécanique  $P'_2$ . Si d'elle soustraire la puissance des pertes mécaniques  $P_{\text{méc}}$  conditionné par la friction dans les roulements et sur l'air, et la puissance des pertes supplémentaires  $P_{\text{suppl}}$  lié aux pulsations du flux de force magnétique dans la zone des rainures du noyau magnétique et aux champs de la dispersion, nous recevrons la puissance mécanique sur l'arbre  $P_2$ . Alors le rendement du moteur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (11.31)$$

où  $\Delta P$  – les pertes totales dans le moteur.

Certaines des pertes (par exemple pertes fer) pratiquement ne dépendent pas de la charge, les autres (par exemple, électrique dans les bobinages du stator et du rotor) – sont liés à la charge. En tout, avec la croissance de la charge les pertes augmentent, et donc augmente la chauffe du moteur. La limite de puissance mécanique sur l'arbre, que le moteur peut développer à long terme (indéfiniment), sans être surchauffé plus de la température admissible s'appelle la **puissance nominale du moteur**. Elle est indiquée dans le passeport du moteur. Le rendement du moteur à la charge nominale dépend dans une grande mesure de la puissance nominale du moteur. Plus la puissance du machine, moins les pertes relatives en elle et plus le rendement.

Pour les moteurs de grands puissance le rendement nominal est très élevé et atteint des valeurs 0,9–0,97, tandis que pour les moteurs des basses puissance

(près de 1 kW) il est égal seulement 0,7–0,8. En outre à d'autres conditions égales le rendement nominal est plus élevé pour le moteur avec une plus grande vitesse synchrone.

La puissance électromagnétique du moteur  $P_{\text{él.magn}}$  peut être représentée par le produit du couple des forces électromagnétiques par la vitesse angulaire du champ

$$P_{\text{él.magn}} = M \cdot \omega_1 = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} . \quad (11.32)$$

La puissance mécanique du rotor  $P_2'$  à son tour est égale au produit du couple par la vitesse angulaire du rotor

$$P_2' = M \cdot \omega_2 = M \frac{2\pi \cdot n_2}{60} . \quad (11.33)$$

La puissance électromagnétique du rotor

$$\begin{aligned} P_{\text{él.magn.rotor}} &= P_{\text{él.magn}} - P_2' = \\ M \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) &= M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = M \cdot \omega_1 \cdot g = P_{\text{él.magn}} \cdot g . \end{aligned} \quad (11.34)$$

Lors du démarrage du moteur, lorsque  $g = 1$ , la puissance électromagnétique  $P_{\text{él.magn}}$  est égale à la puissance des pertes dans le rotor  $P_{\text{él.magn.rotor}}$ , et en train de l'accélération les pertes dans le rotor diminuent.

Ainsi, le glissement  $g$  est une mesure des pertes dans le rotor.

En mode normal de fonctionnement d'un moteur son glissement faible  $g$ , de l'ordre de quelques pour cent, est une condition importante de ses qualités économiques.

## 11.7 Couple de la machine asynchrone

Déterminerons le couple par les pertes dans le rotor et le glissement

$$M = \frac{P_{\text{él.magn.rotor}}}{\omega_1 \cdot g} = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot g} . \quad (11.35)$$

Conformément au diagramme vectoriel (fig. 11.6)  $I_2 \cdot R_2 = E_2 \cdot \cos\psi_2$ , et selon les formules (11.6) et (11.7) la F.E.M. du rotor est égale

$$E_2 = E_{2.\text{imm}} \cdot g = 4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi \cdot g . \quad (11.36)$$

En mettant (11.36) à l'équation du couple (11.35), nous recevrons

$$M = \frac{4,44 \cdot m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1} \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\psi_2 = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\psi_2 , \quad (11.37)$$

où  $C = \frac{4,44 m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1}$  – une constante pour le moteur donné.

Ainsi, le couple est proportionnel à la multiplication du flux, du courant du rotor et du cosinus de l'angle du déphasage entre le courant et la F.E.M. du rotor.

Les valeurs  $\Phi$ ,  $I_2$  et  $\cos\psi_2$  sont dépendantes dans une plus ou moins grande mesure du glissement ce que conditionne la dépendance du glissement de couple. Pour trouver cette fonction nous transformerons l'expression initiale du couple (11.35), en utilisant les formules (11.8) et (11.20)

$$M = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot g} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot g} \cdot \frac{E_{2,imm}^2 \cdot g^2 \cdot R_2}{R_2^2 + x_{2,imm}^2 \cdot g^2} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} \cdot \frac{E_1^2 \cdot g \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2,imm}^2 \cdot g^2}.$$

Ayant désigné la constante  $\frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} = C_1$  nous recevrons

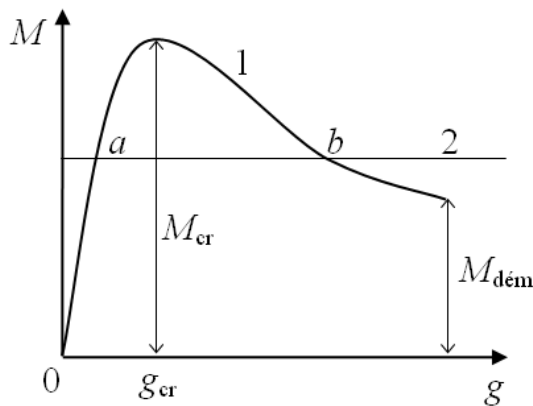
$$M = C_1 \cdot E_1^2 \frac{g \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2,imm}^2 \cdot g^2}. \quad (11.38)$$

Si on néglige la chute de tension dans le bobinage du stator  $I_1 \cdot Z_1$ , on peut remplacer la f.é.m.  $E_1$  par la tension  $U_1$  (11.16). Cependant, cette hypothèse est valable seulement dans les limites connues. À charges et glissements grandes la chute de tension dans le bobinage du stator augmente fortement et la différence entre la tension et la f.é.m. peut être importante. Ceci étant dit, la formule du couple prend la forme suivante :

$$M = C_1 \cdot U_1^2 \frac{g \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2,imm}^2 \cdot g^2}. \quad (11.39)$$

Si  $U_1 = \text{const}$ , ce qui a lieu généralement en mode normal de fonctionnement du moteur, le couple est la fonction du glissement, dont le graphique est représenté par la courbe 1 (fig. 11.11).

À partir d'équation (11.39) et du graphique (fig. 11.11) il vient que lorsque les glissements sont faibles ( $g < g_{cr}$ ) le couple est approximativement proportionnel au glissement. Avec l'augmentation du glissement l'influence de  $g$  dans le dénominateur de l'équation (11.39) devient plus sensible et le couple, atteignant sa plus grande valeur  $M_{cr}$  au glissement  $g = g_{cr}$ , plus loin diminue à une valeur de couple de démarrage  $M_{dém}$  à  $g = 1$ . Le **couple maximal  $M_{cr}$**  et le **glissement  $g_{cr}$** , avec lequel il se développe, **sont appelés critiques**.



**Figure 11.11** – Caractéristique mécanique d'une machine asynchrone

Le moteur travaille avec une vitesse de rotation établie, i.e. invariable, à l'équilibre du couple et du moment de la résistance. Le caractère de la courbe du moment de la résistance  $M_{rés}$  en fonction du glissement (ou de la vitesse) est défini par les propriétés du mécanisme ouvrant. Si  $M_{rés} = f(g)$  a la forme de la courbe 2 (voir la figure 11.11), alors la condition de l'équilibre des moments est respectée lors de deux différents glissements – point  $a$ , qui correspond au glissement faible  $g < g_{cr}$ , et le point  $b$  de glissement  $g > g_{cr}$ .

Cependant, pour le fonctionnement stable du moteur ne suffit pas d'un simple

équilibre des moments. Il est nécessaire que le moteur soit en état de rétablir l'équilibre à ses violations possibles. Cela est possible uniquement si

$$\frac{dM}{dg} > \frac{dM_{\text{res}}}{dg} . \quad (11.40)$$

Comme on voit de la figure 11.11, l'inégalité indiquée a lieu seulement dans le domaine  $g < g_{\text{cr}}$  (le point *a*), c'est-à-dire sur la partie gauche de la courbe  $M = f(g)$ .

Par conséquent, le moteur à induction fonctionne d'une manière durable seulement aux glissements plus petites que le glissement critique. La **partie droite de la courbe**  $M = f(g)$ , qui rapporte au domaine des glissements  $g > g_{\text{cr}}$ , **est appelée instable**. À tels glissements le moteur ne peut pas fonctionner. Ainsi, au fonctionnement avec glissement correspondant au point *b*, n'importe quelle violation accidentelle de l'équilibre des moments dans un sens ou dans l'autre provoque l'accélération du moteur à glissières  $g < g_{\text{cr}}$  (le passage au point *a*) ou son arrêt.

Le couple en mode de charge, correspondant au chauffage admissible du moteur, doit être à une certaine réserve moins que le couple critique  $M_{\text{cr}}$ . Quand le moment de la résistance de charge atteint une valeur critique de couple, le moteur passe sur une partie instable de sa caractéristique  $M = f(g)$  et s'arrête. Il y a « un renversement » du moteur. Plus l'excès du couple critique sur couple nominal, plus les plus grandes surcharges de courte durée le moteur est capable de surmonter. La capacité de surcharge du moteur on caractérise par le **coefficient de capacité de surcharge**  $k_{\text{surchage}}$ , qui est égal à

$$k_{\text{surchage}} = \frac{M_{\text{cr}}}{M_{\text{nom}}} , \quad (1.41)$$

avec  $M_{\text{nom}}$  – couple nominale du moteur.

Pour les moteurs asynchrones généralement  $k_{\text{surchage}} = 1,6-2,5$ . À l'estimation des propriétés de démarrage d'un moteur une signification important a la valeur initiale de couple de démarrage  $M_{\text{démarrage}}$  à  $g = 1$ .

Pour déterminer le glissement critique il faut la dérivée  $\frac{dM}{dg}$  faire égal à zéro et résoudre l'expression reçue relativement  $g$ . Cette analyse montre que

$$g_{\text{cr}} = \frac{R_2}{X_{2.\text{imm}}} , \quad (11.42)$$

et le moment critique, qu'on obtient de l'expression (11.39) après la substitution de la signification  $s = s_{\text{cr}}$ , est égal

$$M_{\text{cr}} = C_1 \cdot U_1^2 \frac{1}{2X_{2.\text{imm}}} . \quad (11.43)$$

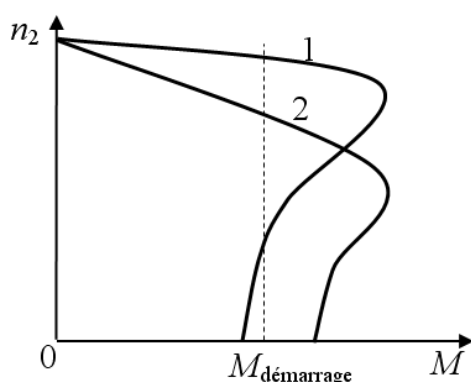
L'étude de cette expression montre que, premièrement, le couple critique, et par conséquent, et la capacité de surcharge du moteur à induction dépendent du carré de la tension. Cela conditionne une haute sensibilité de ces moteurs aux

déviations de la tension du réseau. Même avec une relativement petites réductions de la tension la capacité de surcharge diminue rudement, ce que peut provoquer l'arrêt (« renversement ») de moteur.

Deuxièmement, la valeur de  $M_{cr}$  ne dépend pas de la résistance du rotor  $R_2$ , mais de  $R_2$  dépend le glissement  $g_{cr}$ . Dans le cas des moteurs à bagues grâce à la résistance supplémentaire introduite dans la chaîne du rotor, il est possible d'obtenir un certain nombre de courbes  $M = f(g)$ . De plus l'application d'un rhéostat de démarrage augmente le couple de démarrage  $M_{démarrage}$  (voir le chapitre 11.9).

La dépendance  $M = f(g)$  définit aussi le lien entre la vitesse de rotation et le couple.

Ainsi, le graphique  $M = f(g)$  représente la **caractéristique mécanique** modifiée, i.e. construite dans d'autres coordonnées. Dans les coordonnées ordinaires  $n = f(M)$  elle est représenté sur la figure 11.12. La courbe 1 – pour un moteur à cage et un moteur à bagues sans résistance dans le circuit du rotor ; la courbe 2 – pour un moteur à bagues lorsque on introduit dans le circuit du rotor une résistance supplémentaire.



**Figure 11.12** – Caractéristiques mécaniques d'un moteur asynchrone

Nous transformerons (11.39), en substituant au lieu de  $U_1$  sa signification de (11.43)

$$M = \frac{C_1 \cdot 2M_{cr} \cdot X_{2,imm} \cdot R_2 \cdot g}{C_1(R_2^2 + X_{2,imm}^2 \cdot g^2)} = \frac{2M_{cr}}{\frac{R_2}{X_{2,imm} \cdot c} + \frac{X_{2,imm} \cdot g}{R_2}} \quad (11.44)$$

Compte tenu de (11.42), nous recevrons

$$M = \frac{2M_{cr}}{\frac{g_{cr}}{g} + \frac{g}{g_{cr}}} \quad (11.45)$$

Cette équation simple est utile pour le calcul des caractéristiques mécaniques du moteur à deux valeurs connues –  $M_{cr}$  et  $g_{cr}$ , qu'on peut recevoir du catalogue.

## 11.8 Caractéristiques de fonctionnement des moteurs asynchrones

Les **caractéristiques de fonctionnement des moteurs asynchrones** sont considérées comme **les dépendances de la série des valeurs définissant un ou d'autres propriétés du moteur de la puissance utile  $P_2$**  développée sur l'arbre du moteur, à condition que la tension du réseau est constante. À telles valeurs on rapporte la vitesse de la rotation  $n_2$  ou le glissement  $g$ , le couple  $M$ , le facteur de puissance  $\cos\phi$ , le rendement et le courant du stator  $I_1$ .

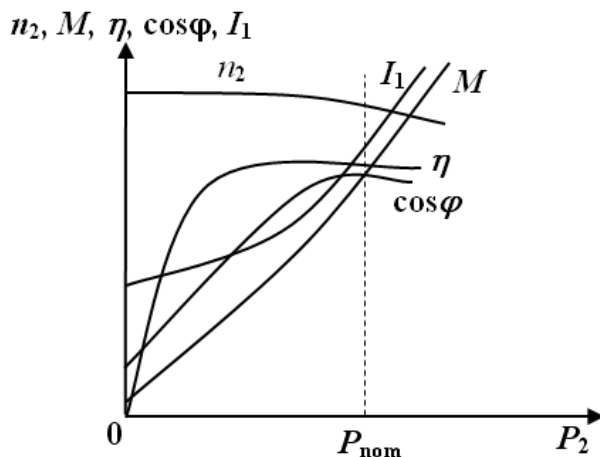
Exemples de graphiques de ces dépendances pour un moteur de l'exécution normale sont représentés sur la figure 11.13. Expliquerons ces caractéristiques.

La dépendance  $n_2 = f(P_2)$  ou  $g = f(P_2)$  est appelée **caractéristique de vitesse**.

À la marche à vide ( $P_2 = 0$ ) la vitesse de la rotation  $n_2$  est proche à la vitesse synchrone  $n_1$  (glissement  $g$  est proche de zéro). Avec l'augmentation de la charge la vitesse de la rotation diminue, le glissement grandit conformément à la relation  $g = \frac{P_{\text{el.magn.rotor}}}{P_{\text{el.magn}}}$  (voir 11.34). Pour des raisons de garantie du haut rendement cette

relation est bornée aux limites étroites. Généralement, lors de  $P_2 = P_{\text{nom}}$  le glissement  $g = 1,54-5 \%$ . En conséquence  $n_2 = f(P_2)$  représente une courbe faiblement inclinée vers l'axe des abscisses.

**Caractéristique de couple  $M = f(P_2)$ .** Puisque la vitesse de la rotation du moteur dans la plage des charges de travail change très légèrement, la dépendance  $M = f(P_2)$  est très proche de linéaire.



**Figure 11.13** – Caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone

**Dépendance  $\cos\varphi = f(P_2)$ .** En raison de la présence dans la chaîne magnétique du moteur de l'entrefer, le courant du stator contient une composante réactive relativement grande. Cela affecte le facteur de puissance. Par conséquent  $\cos\varphi$  du moteur asynchrone est toujours plus petit que l'unité. Sa plus grande signification (0,8–0,9) a lieu à la charge nominale. Avec la réduction de la charge il diminue rudement, en atteignant à la marche à vide des significations 0,15–0,2. Le moteur à

induction chargé incomplètement a un faible facteur de puissance.

**Dépendance  $\eta = f(P_2)$ .** Le rendement du moteur asynchrone a la valeur maximale à la charge nominale ou proche d'elle ( $P_2 \approx P_{\text{nom}}$ ). En cela il est assez grand.

Il faut noter qu'aux charges  $P_2 = (0,25-1,25) \cdot P_{\text{nom}}$  les changements du rendement sont insignifiants. Cela signifie que dans une assez grande gamme de charge le moteur fonctionne de façon économique avec le rendement proche du maximale.

**Dépendance  $I_1 = f(P_2)$ .** Selon la formule (11.24), le courant du stator

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$$

comprend la composante considérable de magnétisation  $I_0$ , qui ne dépend presque pas de la charge, et la composante  $-I'_2$ , qui équilibre la charge du rotor. Principalement en raison de  $I_0$  le moteur asynchrone en l'absence de la charge consomme un relativement grand courant de la marche à vide  $I_{\text{m.a.v.}}$ , qui peut être plus de 50% du courant nominal. Avec la croissance de la charge le courant du stator augmente.

En outre, vers les caractéristiques de fonctionnement on comprend aussi la capacité de surcharge du moteur et sa caractéristique mécanique.

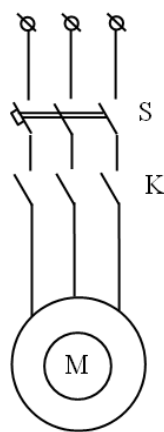
## 11.9 Démarrage des moteurs asynchrones

Comme démarrage (mise en marche) on comprend le branchement de la tension alternative sur les bornes d'un moteur asynchrone et son accélération jusqu'à la vitesse définie par la fréquence de la tension d'alimentation et le moment de la résistance sur l'arbre.

Au moment initial de la mise en marche le rotor du moteur asynchrone est immobile et en son bobinage est induite la f.é.m. de la valeur maximale, dont la fréquence est égale à la fréquence de la tension d'alimentation. Le glissement du rotor à ce moment du temps  $g = 1$  et le courant du rotor atteint la plus grande signification. Le courant consommé par le moteur à  $g = 1$  s'appelle le **courant de démarrage**  $I_{\text{dém}}$ . La multiplicité du courant de démarrage par rapport au courant nominal  $I_{\text{nom}}$  est grande et fait d'habitude  $k_{\text{dém}} = 5-7$ . On peut trouver la multiplicité dans les références sur les moteurs asynchrones.

En fonction du type du moteur, de sa puissance, de la résistance de la charge du mécanisme on utilise de divers moyens de démarrage des machines asynchrones.

**11.9.1 Démarrage des moteurs à cage d'écureuil.** Démarrage du moteur par la connexion directe au réseau du courant alternatif sans limitation des courants est appelé **démarrage direct**. Les pertes dans les bobinages d'un moteur asynchrone sont proportionnelles au carré du courant, et donc on limite la durée de démarrage direct afin d'éviter la surchauffe des bobinages et la panne du moteur.

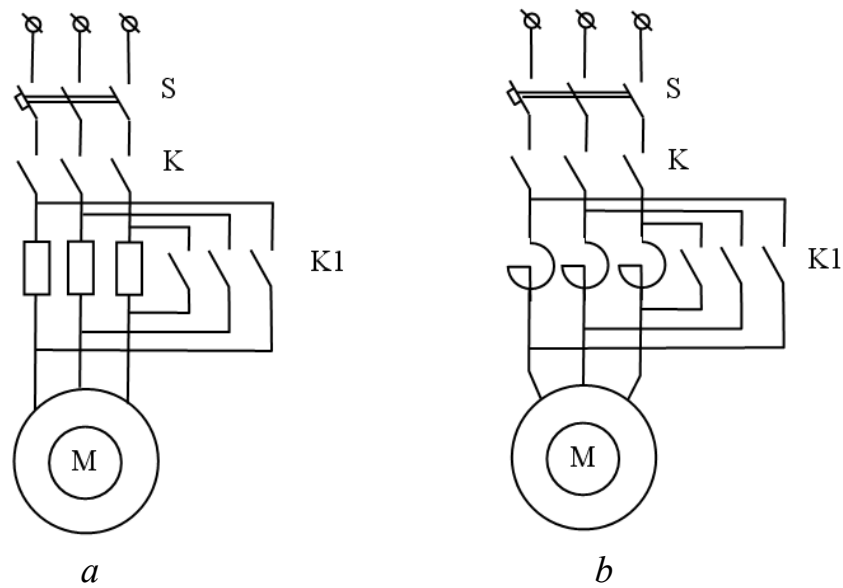


**Figure 11.14** – Démarrage direct d'un moteur asynchrone

On applique le démarrage direct pour les moteurs à cage d'écureuil, qui sont utilisés pour l'entraînement des mécanismes d'inertie faible, dont le temps de l'accélération jusqu'à la vitesse établie est relativement pas grand. Le schéma du démarrage direct d'un moteur asynchrone (fig. 11.14) est très simple que contribuait à sa large utilisation. Il est nécessaire pour le démarrage direct que le couple du moteur asynchrone dépasserait le moment de la résistance du mécanisme.

Démarrage des moteurs des mécanismes avec un grand moment d'inertie on réalise ou sous la tension baissée, ou par l'introduction dans le circuit du stator des résistances de mise en marche. Lors du démarrage par insertion de résistances de mise en marche statoriques (fig. 11.15), d'abord on branche le contacteur  $K$  et l'accélération du moteur est réalisée avec les résistances (fig. 11.15, *a*) ou les réactances (fig. 11.15, *b*), inséré à la chaîne du bobinage du stator. Puis, avec un retard du temps est activé le contacteur  $K1$  et ses contacts shuntent les résistances de mise en marche dans la chaîne du bobinage du stator.

La mise en marche selon le schéma (fig. 11.15, *b*) est appelé démarrage par réacteur.



**Figure 11.15** – Schéma du démarrage d'un moteur asynchrone :  
*a* – par insertion de résistances ; *b* – par insertion de réactances

**11.9.2 Démarrage des moteurs à bagues.** Le principal avantage de ces moteurs est la possibilité de l'introduction de résistances supplémentaires dans le circuit du rotor, et par conséquent, la limitation de courant de rotor dans la phase de démarrage.

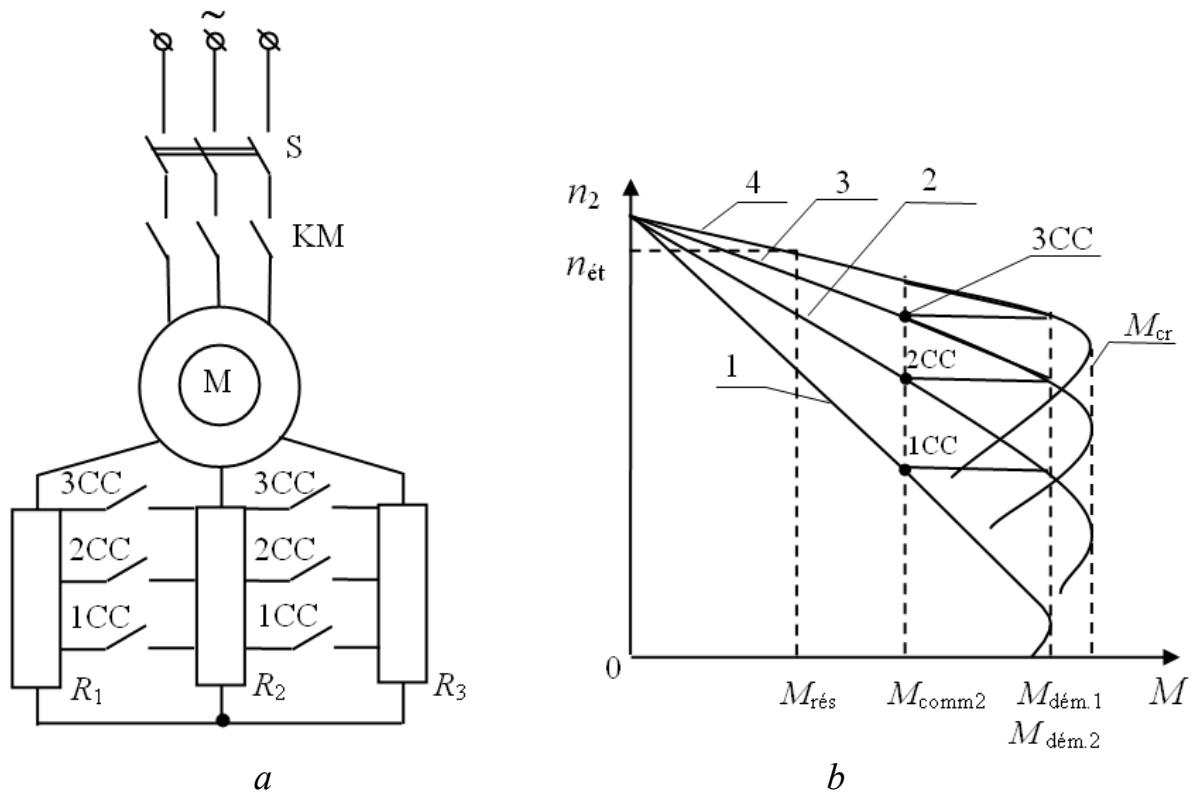
La figure 11.16, *a* montre le schéma de démarrage par élimination de résistances rotoriques. Dans ce cas la mise en marche d'un moteur asynchrone est effectuée le plus souvent en fonction du temps. Pour mettre le moteur en marche le combinateur de commande (les circuits de commande sur le schéma ne sont pas montrés) est mis à la position de départ, à qui les contacts 1CC – 3CC sont ouverts et dans le circuit du rotor les résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  sont entièrement mis en place. Après le démarrage du moteur (bouclage des contacts de puissance du circuit de démarreur KM) avec l'extrait du temps  $t_1$ , les contacts du combinateur de l'accélération 1CC se renferment et shuntent le premier degré des résistances  $R_1 - R_3$ . Ensuite avec l'extrait du temps  $t_2$ , se renferment des contacts du contacteur d'accélérer 2CC et shuntent le deuxième degré des résistances  $R_1 - R_3$ . Et, avec l'extrait du temps  $t_3$  ils shuntent le troisième degré des résistances  $R_1 - R_3$ .

L'insertion des résistances au rotor du moteur asynchrone conduit à l'augmentation du glissement critique :

$$g_{cr} = \frac{c_1(R'_2 + R'_{2.supl})}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}} \quad (11.46)$$

où  $R_{2.supl}$  – résistance supplémentaire dans la chaîne du rotor, réduite au bobinage du stator du moteur asynchrone.





**Figure 11.16** – Schéma (a) et diagramme (b) de démarrage par insertion de résistances rotoriques d'un moteur à bagues

L'augmentation  $g_{cr}$  à son tour augmente l'inclinaison des caractéristiques mécaniques (fig. 11.16, b). Le moment critique du moteur asynchrone ne dépend pas de la résistance de la chaîne de rotor. Sa valeur, malgré l'insertion  $R'_{2supl}$ , reste l'invariable. On accomplit le schéma de la gestion du démarrage rhéostatique d'une telle manière que les moments de la commutation  $M_{dém.1}$  et  $M_{dém.2}$  pour tous étapes de démarrage soient identiques.

Sur la figure 11.16, b aux caractéristiques mécaniques de démarrage 1, 2, 3 correspondent les résistances supplémentaires  $R_{suppl.1} > R_{suppl.2} > R_{suppl.3}$ . Après l'insertion le moteur asynchrone travaille sur la caractéristique 1. Dans le point 1CC les contacts 1CC du conjoncteur se ferment et le moteur asynchrone passe sur la caractéristique 2, et dans le point 2CC il y a son passage à la caractéristique 3. Après le shuntage des résistances supplémentaires dans le point 3CC le moteur asynchrone passe sur la caractéristique naturelle (la courbe 4) et atteint de la vitesse établie  $n_{ét}$ , défini par le moment de la résistance de  $M_{rés}$ . La signification du moment de la commutation de  $M_{comm2}$  est définie par les valeurs de l'extrait du relais du temps des circuits de commande, qui sont configurés aux significations souhaitées.

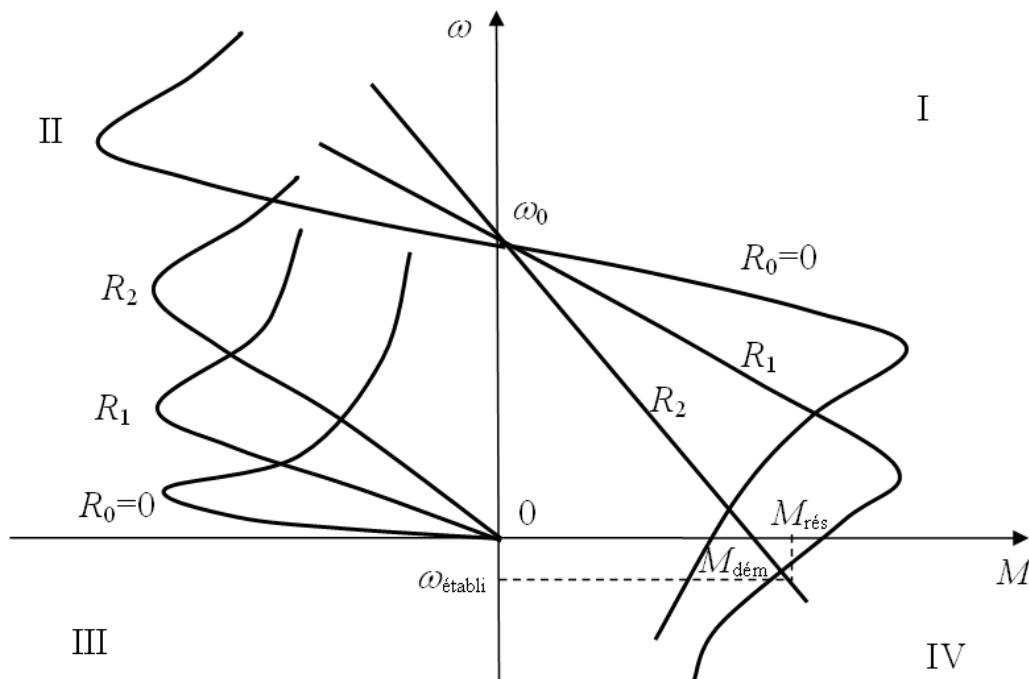
Dans la pratique on utilise et d'autres schémas de démarrage des moteurs asynchrones [29].

## 11.10 Caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone dans les modes de freinage

Dans le chapitre 11.7 ont été examinés les caractéristiques mécaniques de la machine asynchrone, fonctionnant au régime moteur. Toutefois, le moteur asynchrone peut encore fonctionner dans les modes de freinage : le freinage par récupération, le freinage par contre-courant et le freinage dynamique.

Le freinage par récupération de l'énergie dans le réseau (le mode en génératrice en parallèle avec le réseau) est possible à la vitesse plus haut que synchrone. Les caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone dans les coordonnées de  $M$  et  $\omega$  sont présentés sur la figure 11.17. Dans le quadrant I sont disposés les terrains des caractéristiques du mode moteur pour trois différentes résistances du circuit de rotor. Dans la mesure de l'approche de la vitesse du moteur à la vitesse de la marche à vide idéale, ou de la vitesse synchrone, le couple du moteur s'approche de zéro.

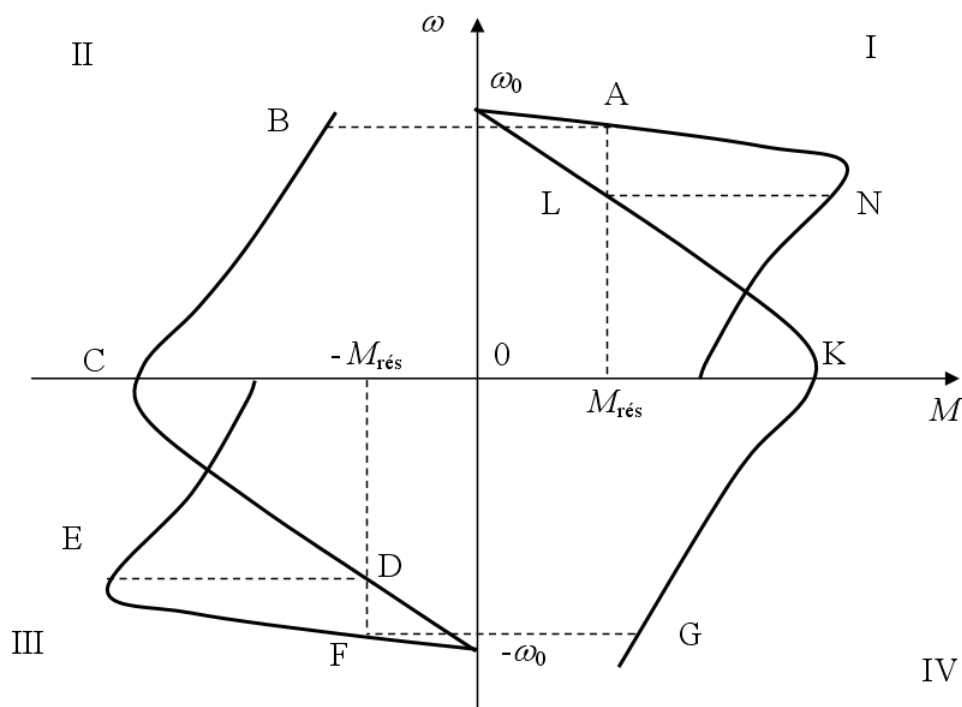
À l'augmentation de la vitesse angulaire sous l'influence du moment externe, quand  $\omega = \omega_0$ , le moteur fonctionne en mode génératrice en parallèle au réseau, dont il peut donner de l'énergie électrique, tout en consommant de la puissance réactive pour l'excitation. Au freinage par récupération correspondent les terrains des caractéristiques, situés dans la partie supérieure du quadrant II. Dans ce mode, le couple maximum a plus de valeur que dans le mode de moteur. Le mode de freinage par récupération de l'énergie dans le réseau est utilisé pratiquement pour les moteurs à commutation des pôles, ainsi que pour des commandes des équipements de levage (les ascenseurs, les excavateurs etc.) et dans certains autres cas.



**Figure 11.17** – Caractéristiques mécaniques de la machine asynchrone dans les modes différents

Le freinage par contre-courant a beaucoup d'applications dans la pratique. Le mode de freinage par contre-courant peut être obtenu, ainsi que pour le MCC, lors du moment de la charge  $M_{rés} > M_{dém}$  (fig. 11.17). Pour la limitation de courant et la réception du couple nécessaire lors de l'utilisation du moteur à bagues à sa chaîne de rotor insérer une résistance supplémentaire. Au régime établi en cas de freinage par contre-courant correspond, par exemple, le point  $\omega_{établi}$ ,  $M_{rés}$  sur la caractérisation de  $R_2$  (fig. 11.17).

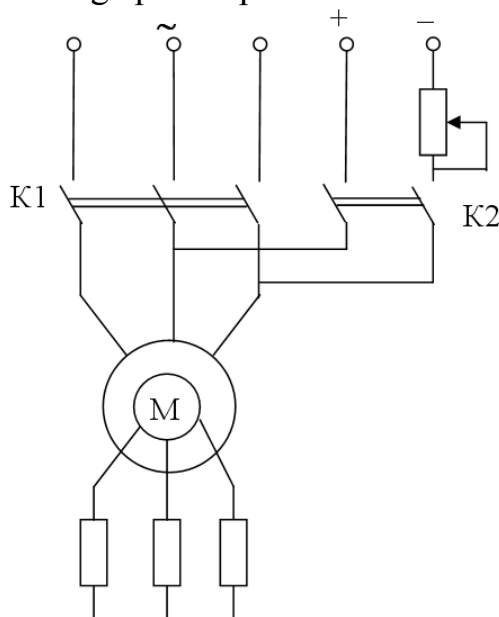
La caractéristique mécanique pour  $R_1$  en mode de freinage par contre-courant et  $M_{rés} = \text{const}$  n'assure pas le travail stable. Le freinage par contre-courant peut être obtenue également par la commutation pendant la marche des deux phases du bobinage du stator, ce qui conduit à un changement de sens de la rotation du champ magnétique (le passage du point A au point B dans la figure 11.18). Dans ce cas le rotor tourne contre le sens de mouvement du champ et ralentit graduellement. Lorsque la vitesse angulaire tombe à zéro (point C sur la figure 11.18), il faut déconnecter le moteur du réseau, sinon il peut à nouveau passer au régime moteur, et en outre son rotor tournera dans le sens inverse du précédent (point D).



**Figure 11.18** – Caractéristiques mécaniques de la machine asynchrone lors de la commutation de deux phases du stator

Le freinage dynamique du moteur à induction se réalise d'habitude par l'insertion du bobinage du stator sur le réseau du courant continu; le bobinage du rotor se renferme de plus sur les résistances extérieures. Pour passer du mode moteur au mode de freinage dynamique le conjoncteur K1 (fig. 11.19) déconnecte le stator du réseau du courant alternatif, et le conjoncteur K2 connecte le bobinage du stator au réseau du courant continu. Pour limiter le courant et obtenir les différentes caractéristiques de freinage dans la chaîne du rotor on prévoit les résistances extérieures.

En passant par le bobinage du stator, le courant continu forme le champ immobile, dont l'onde principale crée la distribution sinusoïdale de l'induction. Dans le rotor tournant apparaît le courant alternatif créant son champ, qui est aussi immobile par rapport au stator. À la suite d'une interaction totale du flux magnétique avec le courant du rotor apparaît le moment de freinage, qui dépend de la force magnétomotrice du stator, de la résistance du rotor et de la vitesse angulaire du moteur. Les caractéristiques mécaniques de ce mode sont indiquées au bas du quadrant II (voir la figure 11.17). Elles passent dans le début des coordonnées, puisque à la vitesse angulaire égale à zéro, le couple de freinage dans ce mode est aussi égal à zéro. Le couple maximum est proportionnel au carré de la tension appliquée au stator et augmente avec l'augmentation de la tension. Le glissement critique dépend de la résistance de la chaîne de rotor. Il augmente en proportion de la croissance de la résistance. Le couple maximum ne change pas de plus.



**Figure 11.19** – Schéma de passage en mode de freinage dynamique

Sur la figure 11.17 les caractéristiques du freinage dynamique sont données pour trois différentes résistances du circuit du rotor et le même courant de stator.

Parfois on applique le freinage par auto excitation, en connectant au stator la batterie de condensateur. Dans ce cas la machine asynchrone fonctionne en mode d'une génératrice asynchrone, en recevant le courant magnétisant des condensateurs. En s'excitant du côté du stator, la machine à une vitesse angulaire définie génère l'énergie, délivrée sous forme de chaleur dans la chaîne de rotor. Ses schémas de freinage encore n'ont pas trouvé une large application en raison d'un haut coût des condensateurs. Dans la

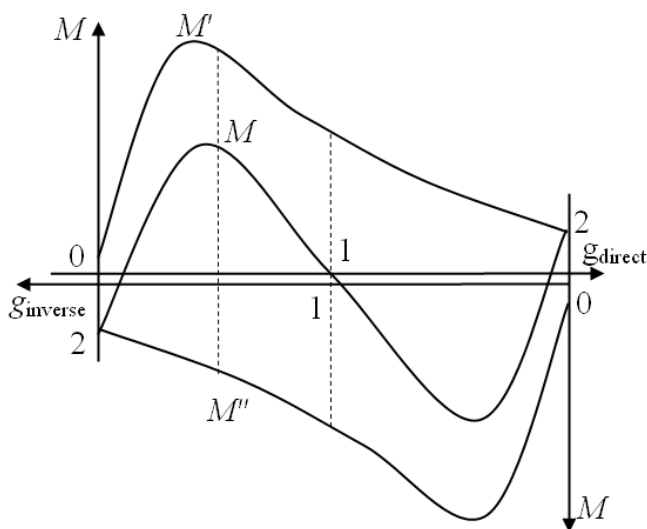
pratique, le plus souvent on utilise le freinage par contre-courant, particulièrement quand il faut réaliser le changement de sens de rotation (reversement), ou le freinage dynamique, quand le reversement n'est pas demandé.

### 11.11 Moteur asynchrone monophasé

Le moteur asynchrone monophasé a un bobinage situé sur le stator. Le bobinage activé par le courant alternatif produit le champ magnétique pulsatoire. Si à ce champ placer le rotor avec l'enroulement à court-circuit, il ne tournera pas. Mais, si on détord le rotor par une force mécanique externe à n'importe quelle sens, le moteur fonctionnera constamment. On peut expliquer cela de la manière suivante.

Le champ magnétique pulsatoire on peut remplacer par deux champs magnétiques tournant dans les sens opposées avec la fréquence synchrone  $n_1$  et

ayant les amplitudes des flux de force magnétique, égale à la moitié de l'amplitude du flux magnétique du champ pulsatoire. Un des champs magnétiques s'appelle le champ direct, l'autre – le champ inverse. Chacun des champs magnétiques induit dans le bobinage de rotor les courants de Foucault. Lors de l'interaction des courants de Foucault avec des champs magnétiques se forment des couples, dirigés en sens inverse l'un de l'autre.



**Figure 11.20** – Couples direct et inverse du moteur monophasé en fonction du glissement

Sur la figure 11.20 sont représentés les dépendances du couple du champ direct  $M'$ , du couple du champ inverse  $M''$  et du couple résultant  $M = M' - M''$  en fonction du glissement. Les axes des glissements sont dirigés en sens inverse l'un de l'autre. En régime de démarrage sur le rotor agissent les couples identiques par la valeur et opposés en sens.

Si détordre le rotor par la force étrangère en sens du champ magnétique direct, il y aura un couple excédentaire (résultant) dispersant le rotor jusqu'à la

vitesse, proche de la synchrone. Alors le glissement du moteur relativement au champ direct  $g_{\text{direct}} \approx 0$ ,  $n_1 \approx n_2$ .

Le glissement du moteur relativement au champ magnétique inverse

$$g \approx \frac{n_1 - (-n_1)}{n_1} \approx 2.$$

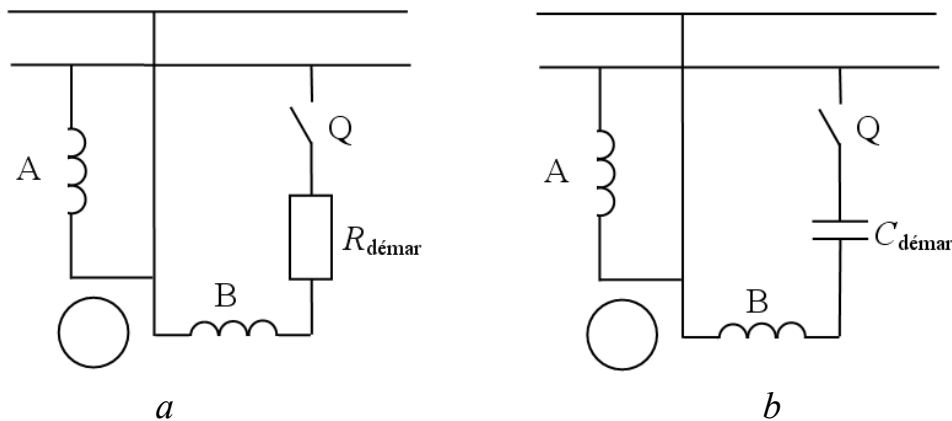
En examinant la caractéristique résultante, on peut faire les conclusions suivantes :

1. Le moteur monophasé n'a pas de couple de démarrage. Il tournera dans le sens à qui est détordu par la force extérieure.
2. À cause de l'action de freinage du champ inverse les caractéristiques du moteur monophasé sont plus mauvaises que du moteur triphasé.

Le moteur à induction monophasé (fig. 11.21) est alimenté par une tension monophasée et a sur le stator deux bobines : une principale (de marche) A et une auxiliaire (de démarrage) B ; le rotor du moteur accomplissent en court-circuit. Le courant alternatif, en passant par la bobine principale, qui occupe généralement 2/3 des rainures du stator, crée la force magnétisante pulsatoire, et la dernière – le champ magnétique pulsatoire.

Pour le démarrage du moteur asynchrone monophasé on utilise une bobine de démarrage B, positionné dans l'espace relativement à la bobine de marche sur  $90^\circ$ . De plus les courants des bobines de marche et de démarrage doivent être décalée dans le temps ce qui est atteint par leur connexion ou au réseau symétrique biphasé, ou au réseau monophasé. Dans le dernier cas pour obtenir

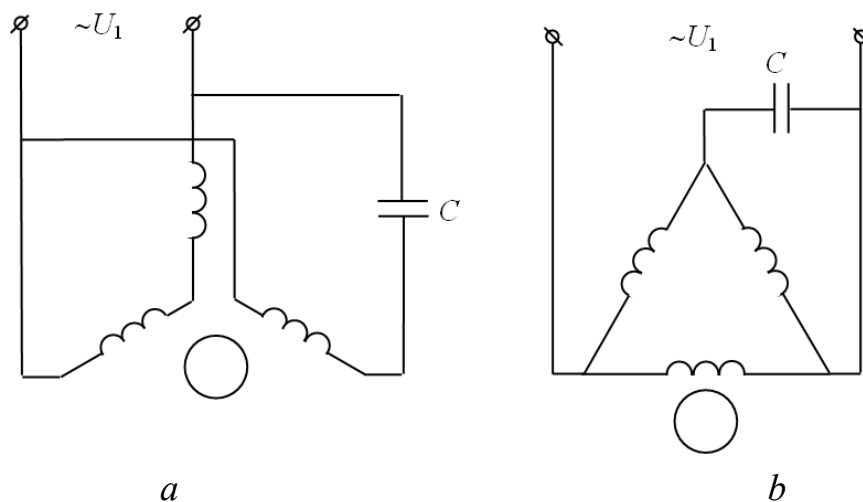
un décalage de phase entre les courants dans les bobinages on connecte la bobine de marche A au réseau directement, et la bobine de démarrage B – par l'intermédiaire de la résistance  $R_{\text{démarr}}$  (fig.11.21, *a*) ou du condensateur  $C_{\text{démarr}}$  (fig. 11.21, *b*). La bobine de démarrage B est connecté uniquement pendant le démarrage du moteur. Lorsque la fréquence de rotation devient de l'ordre de 0,7 de la fréquence synchrone la bobine de démarrage à l'aide du bouton-interrupteur, l'interrupteur ou le relais électromagnétique est déconnectée, et le moteur fonctionne par la suite comme monophasé.



**Figure 11.21** – Schémas de démarrage du moteur monophasé :  
*a* – à résistance de démarrage ; *b* – à condensateur de démarrage

Caractéristiques de fonctionnement des moteurs monophasé sont de pire que des moteurs triphasés : le rendement et le facteur de puissance sont de plus petits.

Du réseau à une phase peuvent travailler et les moteurs asynchrones triphasés, si on utilise un de schémas présentés sur la figure 11.22.



**Figure 11.22** – Schémas de l'insertion du moteur triphasés au réseau monophasé

Dans le schéma sur la figure 11.22, *a* les bobinages statoriques sont joints par l'étoile, et dans le schéma sur la figure 11.22, *b* – en triangle. Le condensateur C est de démarrage. Il est inclus dans le réseau seulement sur le temps de démarrage. La valeur de sa capacité fait  $C \approx 60 \mu\text{F}$  pour 1 kW de puissance du

moteur. On utilise d'autres schémas de l'insertion des moteurs asynchrones triphasés au réseau monophasé, par exemple, par l'intermédiaire de la résistance.

Les moteurs triphasés, fonctionnant en mode monophasé, peuvent développer la puissance  $P = (0,45-0,65) \cdot P_{\text{nom}}$ , où  $P_{\text{nom}}$  – la puissance nominale du moteur triphasé.

### **Conclusions principales**

1. Une machine asynchrone peut travailler en mode moteur et en mode génératrice. En fonction de la valeur du glissement on distingue les modes (régimes) de la machine asynchrone : moteur, génératrice et par contre-courant.

2. Le glissement  $g$  représente la différence relative des vitesses angulaires du champ  $\omega_1$  et du rotor  $\omega_2$ .

3. En fonction du type d'enroulement le rotor du moteur asynchrone peut être en court-circuit (à cage d'écureuil) ou à bagues collectrices (bobiné).

4. Aux rainures des rotors en court-circuit on met les barreaux de cuivre dont les extrémités sont liés par anneaux. Un tel bobinage est similaire à «cage d'écureuil».

5. La vitesse angulaire du rotor  $\omega_2$  n'est pas égale à la vitesse synchrone angulaire du champ magnétique  $\omega_1$ .

6. Les moteurs asynchrones ont une haute sensibilité aux écarts de tension du réseau. Relativement petites réductions de tension amènent à la réduction de la capacité de surcharge ce qui peut amener à l'arrêt du moteur.

7. Au moment de démarrage le courant de démarrage d'une machine asynchrone à 5–7 fois dépasse la signification nominale. Pour réduire les courants de démarrage on applique les schémas spéciaux de démarrage des moteurs asynchrones.

8. La particularité distinctive des moteurs monophasés est la bobine auxiliaire (de démarrage) qui est connectée uniquement sur le temps de démarrage du moteur.

9. Caractéristiques de fonctionnement des moteurs monophasés sont de pire que des moteurs triphasés : le rendement et le facteur de puissance sont de plus petits.

10. Les moteurs asynchrones triphasés peuvent travailler dans les réseaux monophasés si on utilise un schéma spécial.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Comment sont constituées les enroulements du rotor en court-circuit et du rotor à bagues collectrices ?

2. Comment on choisisse le schéma de couplage des enroulements du stator et comment définir des débuts et des fins des bobinages du stator ?

3. Comment est créé le couple du moteur à induction et pourquoi le rotor

ne peut pas d'atteindre la vitesse synchrone de la rotation ?

4. Quelle est l'influence du changement de la charge de l'arbre sur le moteur asynchrone ?

5. Quel est la nature de la caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone ?

6. Quelle est la dépendance de la f.é.m. du rotor et de la fréquence du courant du rotor de glissement ?

7. Quel est le rôle de la f.é.m. du stator ? Comment s'inscrit l'équation des tensions du stator et du rotor ?

8. Comment dépend du glissement le courant du rotor ?

9. Sur la base de quels équations est construit le diagramme vectoriel complète et le schéma de substitution du moteur à induction ?

10. Quels pertes de la puissance ont lieu dans le moteur asynchrone ?

11. Comment les pertes électriques dans le rotor dépendent du glissement ?

12. De quoi dépend le couple du moteur asynchrone ? Analysez sa dépendance du glissement.

13. Qu'est ce qu'on comprend par le coefficient de capacité de surcharge et quelle est sa valeur pour les électromoteurs ordinaires asynchrones ?

14. Expliquez les conditions du travail stable d'un moteur asynchrone.

15. De quoi et comment dépendent le couple critique et le glissement critique ?

16. Quelles sont les possibilités pour l'influence sur la caractéristique mécanique du moteur à induction ?

17. Selon quels paramètres on estime les propriétés du moteur de mise en marche ?

18. Caractérisez les avantages et les inconvénients de démarrage direct des moteurs asynchrones à cage.

19. Caractérisez les avantages et les inconvénients de démarrage des moteurs sous la tension baissée.

20. Comment on réalise le démarrage du moteur à bagues collectrices ? Donnez l'estimation totale de leurs propriétés de démarrage.

21. Expliquez la nature des caractéristiques de fonctionnement du moteur asynchrone ?

22. Expliquez la condition du passage du moteur asynchrone au régime générateur. Quelle est la valeur pratique d'un tel régime ?

23. Expliquez les moyens possibles de freinage du moteur asynchrone.

24. Expliquer la construction et le principe de fonctionnement du moteur à induction monophasé.

25. Comment on fait le démarrage des moteurs asynchrones monophasés ?



## Chapitre 12 : MACHINES SYNCHRONES

**Notions clés :** machine synchrone (MS),  $f$ ; bobinage d'excitation,  $m$ ; exciteur,  $m$ ; rotor à pôle lisse (à pôle saillant),  $m$ ; inducteur,  $m$ ; induit,  $m$ ; caractéristique à vide (extérieure) d'une MS,  $f$ ; courant nominal d'excitation,  $m$ ; puissance électromagnétique,  $f$ ; caractéristique angulaire,  $f$ ; synchronisation,  $f$ .

*Les machines synchrones* (MS) sont utilisés comme des génératrices aux centrales électriques et en tant que moteurs à courant alternatif dans commande électrique non réglé des installations industrielles (pompes, compresseurs, soufflantes, moulins de la diverse destination, laminoirs, installations diesel-générateur et d'autres). Le principal avantage des moteurs synchrones consiste à la possibilité de travailler avec un facteur de puissance élevé, ce qui conduit à leur de plus en plus large application.

La vitesse angulaire du moteur synchrone au travail en régime établi avec l'augmentation de la charge sur l'arbre jusqu'à une certaine valeur, ne dépassant pas le couple maximal  $M_{\max}$ , reste strictement constante et égale à la vitesse synchrone angulaire :

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (12.1)$$

où :

$n_0$  – vitesse synchrone de rotation du champ tournant en tr/min ;

$f$  – fréquence du courant statorique en Hz ;

$p$  – nombre de paires de pôles.

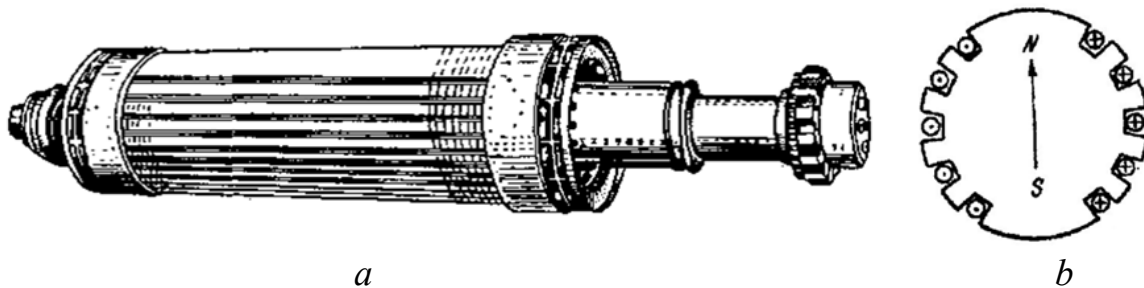
### 12.1 Constitution des machines synchrones

Les MS, comme d'autres machines électriques, sont convertibles, i.e. elles peuvent être utilisées à la fois comme des générateurs et comme des moteurs. Selon sa constitution les MS ont beaucoup de commun avec les machines asynchrones. Nous examinerons les différences dans leur conception.

Le stator d'une MS ne se distingue pas du stator d'une MAS (voir chapitre 11.2.1) – le même noyau recueilli de la tôle d'acier, le même principe de l'exécution et de la connexion de ses enroulements. Le rotor de la MS représente l'électro-aimant de courant continu. Son enroulement est alimenté par un courant continu à partir d'une source auxiliaire. Il est appelé la **bobine d'excitation**. La connexion du bobinage du rotor avec une source du courant continu s'effectue à l'aide de deux anneaux de contact sur l'arbre et des balais immobiles. Comme source de courant continu pour l'alimentation du bobinage d'excitation du rotor est généralement utilisé un générateur de courant continu, qui est le plus souvent monté sur le même arbre avec le rotor. Un tel générateur est appelé **l'excitateur**. L'énergie nécessaire pour l'alimentation de l'enroulement d'excitation est faible et en conséquence la puissance de l'excitateur est d'environ 0,3–5% de la puissance nominale de MS. Pour les grandes MS on installe encore une l'excitateur de

réserve qu'on injecte dans le travail lors d'un problème d'excitateur principal. L'alimentation de l'enroulement d'excitation peut-être aussi en courant alternatif, connecté au stator par les redresseurs.

On applique deux types du rotor des machines synchrones – le **rotor à pôles lisses** et le **rotor à pôles saillants**. Dans le premier cas le cardiaque du rotor représente le corps massif cylindrique de l'acier (la baril du rotor) avec des encoches longitudinales où est placé le bobinage de l'excitation (fig. 12.1, *b*). Les encoches et le bobinage de l'excitation s'installent de telle façon pour recevoir la distribution sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer entre les cardiaques du rotor et du stator. La vue générale du rotor à pôles lisses est montrée sur la figure 12.1, *a*. Un tel rotor est appliqué au nombre de paires de pôles  $p \leq 2$ .



**Figure 12.1** – Rotor d'une machine synchrone à pôles lisses :  
*a* – vue générale ; *b* – section transversale

Le rotor à pôles saillants comprend la roue massive en acier mise sur l'arbre. Sur la surface extérieure de la roue sont fixées les noyaux en acier des pôles (fig. 12.2, *b*). Ces derniers sont accomplis en tôle d'acier. Pour de machines de faible puissance et à pas trop grand nombre de pôles au lieu de la roue sur l'arbre s'assoit une douille en acier à laquelle sont attachés les pôles. Le bobinage de l'excitation en forme des bobines est placé sur des noyaux de pôles. Pour obtenir une onde sinusoïdale de la distribution de l'induction l'entrefer entre la surface du fin de pôle et la surface intérieure du stator est fait non uniforme aux frais de la forme spéciale des fins de pôles. La distribution sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer est nécessaire pour avoir la f.é.m. sinusoïdale dans les bobinages du stator.

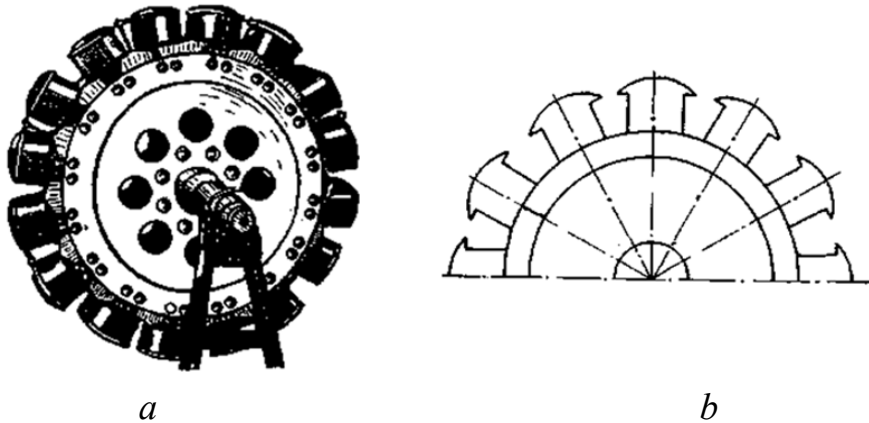
La vue générale du rotor à pole saillant est montrée sur la figure 12.2, *a*.

Ainsi, une **machine synchrone**, comme asynchrone, **comprend d'un circuit magnétique**, des **bobinages** et des **pièces mécaniques**. Le noyau magnétique comprend les noyaux des pôles, la jante du rotor, ou le corps du rotor à pôles lisses, le noyau du stator et l'entrefer entre le rotor et le stator (fig. 12.3).

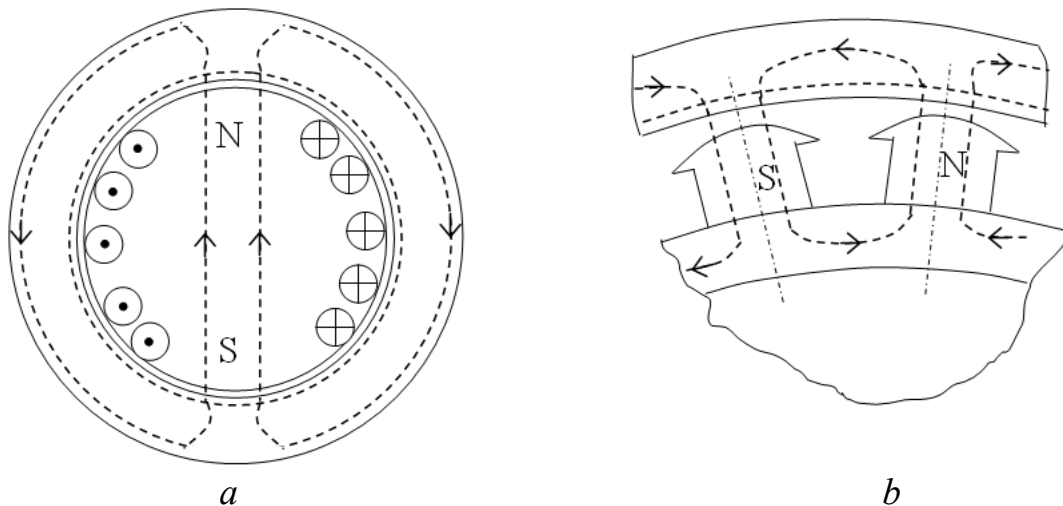
Le bobinage du courant alternatif de MS est placé dans les encoches du noyau du stator. Pour les machines triphasées ce sont trois bobinages de phases déplacés spatialement sur 120 degrés électriques. Le rotor a le bobinage de d'excitation alimenté en courant continu. Les pièces mécaniques : corps moulé ou soudé, arbre, boucliers à palier, compteurs et d'autres détails nécessaires au montage et l'assemblage de la machine.

Pour les machines à pôles lisses l'arbre d'habitude est forgé de concert avec le noyau du rotor. Le rotor de la machine synchrone comme la source du champ

magnétique est appelé *inducteur*. La pièce de la machine, dont dans le bobinage est induit la f.é.m. on a appelé l'*ancrer*. Pour une MS de la conception classique l'ancrer est le stator.



**Figure 12.2** – Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants :  
*a* – vue générale ; *b* – section transversale



**Figure 12.3** – Flux de force magnétique d'une machine synchrone :  
*a* – à pôle lisse ; *b* – à pôle saillant

## 12.2 Génératrice synchrone

Dans une *génératrice synchrone* (GS) il y a conversion d'énergie mécanique en énergie du courant électrique alternatif, généralement triphasé. Le rotor de l'alternateur avec un champ magnétique constant est mis en rotation par un moteur primaire (à la vapeur ou de la turbine hydraulique, diesel, etc.). En conséquence de l'induction électromagnétique dans les enroulements du stator (ancrer) est induit les f.é.m. variables. Puisque dans le stator du générateur triphasé se trouvent les trois bobinages identiques, symétriquement déplacés spatialement sur 120 degrés électriques, leurs f.é.m. sont identiques par leurs valeurs efficaces et de l'amplitude et sont symétriquement déphasés sur 120°. La fréquence de la f.é.m. de l'induit est déterminée par la vitesse de rotation et le nombre de paires de pôles du rotor (12.1). La fréquence du courant est standardisée et doit être constante. De (12.1)

on voit que pour obtenir une fréquence donnée du courant alternatif il est nécessaire d'assurer une vitesse de rotation strictement défini, constante et ne dépendant pas de la charge, égale à  $\omega_0$ . À cette fin, les moteurs primaires sur les centrales électriques sont équipés d'un contrôle automatique de la vitesse.

La vitesse de la rotation du rotor demandée pour la fréquence donnée est moins plus est grande le nombre de paires de pôles  $p$ . C'est pourquoi les générateurs, fonctionnant des moteurs primaires à faible vitesse, sont multipolaire.

Selon la nature du moteur primaire on distingue **deux principaux types de générateurs synchrones** – les **turbo-génératrices** et les **générateurs hydroélectriques**. Les premiers sont installés dans les centrales thermiques et fonctionnent à partir de turbines à vapeur, les seconds sont appliqués sur les centrales hydroélectrique. Les puissances des turbo-génératrices et des générateurs hydroélectriques atteignent souvent plusieurs centaines (500 et plus) de mille de kilowatts.

Les turbines à vapeur sur les centrales thermiques ont une grande vitesse de rotation (d'habitude 3000 tr/min). La turbogénératrice de la fréquence standard  $f = 50$  Hz, travaillant à une telle vitesse, doit avoir le nombre de paires de pôles

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{3000 \cdot 2\pi} = 1,$$

c'est-à-dire son rotor doit être bipolaire. En outre, lors de la grande vitesse de rotation très importante est la question de la garantie de la solidité mécanique du rotor. Par conséquent, on fait les turbogénératrices avec un rotor à pôles saillants. Ils ont les dimensions relativement petites en radiales et considérable en axiaux.

Les générateurs hydroélectriques ont généralement de petites vitesses de rotation (de 50 à 300 tr/min). Pour obtenir un courant alternatif de la fréquence standard  $f = 50$  Hz les générateurs hydroélectriques sont effectuées sur un grand nombre de paires de pôles. Ainsi, par exemple, à la vitesse  $n = 50$  tr/min le nombre de paires de pôles doit être égal à

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{50 \cdot 2\pi} = 60.$$

Pour leur placement on fait augmenter les dimensions transversales du générateur. Les générateurs hydroélectriques sont fabriqués à pôles saillants et ils ont d'assez grandes dimensions radiales à dimensions axiales modérées. En général, ils sont fabriqués pour l'installation verticale. Les GS sont fabriqués à la tension de 0,4 ; 6,3 ; 10,5 ; 15 ; 20 kV.

À la marche à vide du générateur le courant de l'ancre est égal à zéro et le champ magnétique est créé uniquement par le bobinage de l'excitation du rotor. Grâce à la répartition des enroulements du stator et du rotor de la machine à pôles saillants et aussi en raison de la forme spéciale des pièces polaires du rotor à pôles saillants on obtient ce que le changement du flux de force magnétique des enroulements de l'ancre à la rotation du rotor est pratiquement sinusoïdal. Cela est nécessaire pour obtenir la f.é.m. sinusoïdale dans l'ancre. Une telle forme de la courbe de la f.é.m. est une exigence de la norme aux générateurs à courant

alternatif. Dans ce cas, la valeur efficace de la f.é.m. dans les bobinages de l'ancrage est déterminée par la formule analogue pour les bobinages de MAS (11.7), i.e.

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k \cdot \Phi_0, \quad (12.2)$$

où :

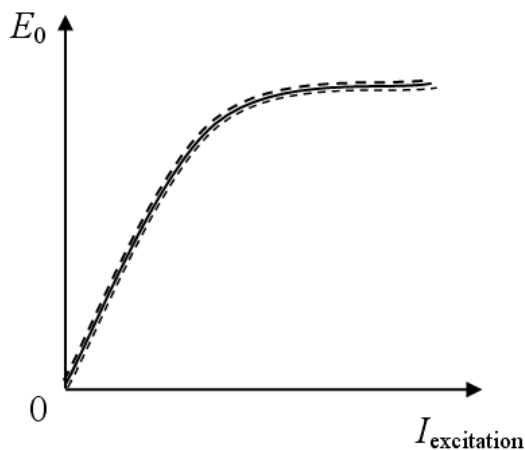
$E_0$  – f.é.m. du bobinage de phase en V ;

$f$  – fréquence de la f.é.m. de l'ancrage en Hz ;

$w$  – nombre de spires du bobinage de phase ;

$k$  – facteur de bobinage de l'ancrage ;

$\Phi_0$  – flux du rotor pénétrant dans le noyau du stator en weber.



**Figure 12.4** – Caractéristique à vide d'un générateur synchrone

Si la fréquence  $f$  est constante il est possible d'influencer sur la valeur de la f.é.m. de l'ancrage par le flux  $\Phi_0$ , qui est créé par le courant d'excitation du rotor  $I_{excitation}$ . La dépendance de la f.é.m. de l'ancrage de courant d'excitation lors de la vitesse nominale de la rotation et l'absence de charge de l'ancrage ( $I = 0$ ) s'appelle **caractéristique à vide**. Sa nature ordinaire est présentée sur la figure 12.4. Puisque  $E_0 \equiv \Phi_0$ , alors  $E_0 = f(I_{excitation})$  est défini par les propriétés de la chaîne magnétique de la machine et à une autre échelle répète la courbe  $\Phi_0 = f(I_{excitation})$ .

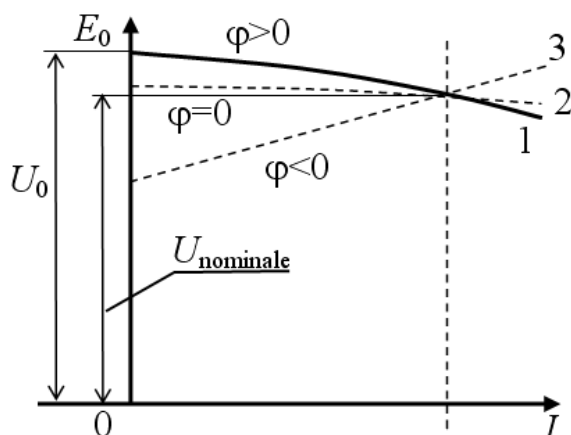
La caractéristique à vide peut être construite selon le calcul de circuit magnétique ou en vertu d'essai à vide. Cet essai se déroule à la vitesse nominale et la charge déconnectée. On mesure la tension à l'ancrage lors de l'augmentation progressive du courant d'excitation à partir de zéro et puis lors de sa réduction. En conséquence de l'hysteresis ces tensions peuvent ne pas coïncider. Pour la construction de la caractéristique à vide on accepte les valeurs moyennes.

### 12.3 Caractéristiques extérieure du générateur synchrone

La **caractéristique extérieure du générateur** on appelle la **dépendance de la tension du courant de la charge**  $U = f(I)$  à  $n = const$ ,  $I_{excitation} = const$ ,  $\cos\varphi = const$ . Le plus grand intérêt présente la caractéristique extérieure  $U = f(I)$  quand la vitesse  $n$  et  $\cos\varphi$  sont nominales et le courant inducteur est dans la plage des courants de la charge de  $I = 0$  jusqu'à  $I = I_{nom}$ .

Le courant d'excitation, qui doit être à la charge nominale, i.e. à  $U_{nom}$ ,  $I_{nom}$  et  $\cos\varphi_{nom}$ , s'appelle le **courant d'excitation nominal**. Les générateurs normalement sont calculés pour le travail à la valeur du facteur de puissance nominale  $\cos\varphi_{nom} = 0,8-0,9$  pour la charge mixte active et inductive. Dans ce cas l'influence essentielle fait la réaction longitudinale-désaimantant de l'ancrage.

C'est pourquoi à la réduction de la charge de nominal la tension augmente assez vite (la courbe 1 sur la figure 12. 5).



**Figure 12.5** – Caractéristique extérieure d'un générateur synchrone

Le changement (augmentation) relatif de la tension peut atteindre plusieurs dizaines des pour cent. Par le **changement relatif de tension** on comprend l'augmentation de la tension exprimée en pourcentage vers nominal au passage du mode de la charge nominale vers la marche à vide. Elle est égale à

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{nom}}}{U_{\text{nom}}} 100. \quad (12.3)$$

Comme  $\cos\varphi$  de charge peut être différente de la valeur nominale, cela influe à son tour sur la caractéristique extérieure de l'alternateur. Sur la figure 12.5 courbe 2 représente caractéristique extérieure lorsque la charge est active ( $\varphi = 0$ ), la courbe 3 – à la charge active-capacitif ( $\varphi < 0$ ). La caractéristique extérieure peut être construit à l'aide de diagrammes vectoriels ou d'après les données de l'essai.

Pour maintenir la tension de l'alternateur constante au changement de la charge par la valeur et par le nature on règle le courant d'excitation du rotor.

## 12.4 Couple électromagnétique du générateur synchrone

La puissance mécanique entrant sur l'arbre du générateur après déduction des pertes, sera convertie en puissance électrique. La puissance électrique utile du générateur est égale à

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (12.4)$$

où :

$m$  – nombre de phases de l'ancre ;

$U$  – tension extérieure ;

$I$  – courant de l'ancre ;

$\cos\varphi$  – facteur de puissance.

Une partie de la puissance électrique se dépense dans les bobinages de l'ancre en forme des pertes électriques dans l'ancre :  $P_{\text{él. ancre}} = m \cdot I^2 \cdot R$ . La puissance électrique complète de l'ancre égal à la somme de la puissance électrique utile du générateur et la puissance des pertes dans l'ancre est appelé **puissance électromagnétique du générateur** :

$$P_{\text{él. magn}} = P + P_{\text{él. ancre}} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi + m \cdot I^2 \cdot R = m \cdot I \cdot (U \cos\varphi + I \cdot R). \quad (12.5)$$

La **puissance électromagnétique du moteur** s'exprime également. Seulement pour le moteur elle représente telle partie de la puissance électrique amenée, qui est convertie en énergie mécanique.

L'expression du couple électromagnétique de la MS a la forme suivante

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.6)$$

où :

$\omega$  – vitesse angulaire de la rotation du rotor ;

$E_0$  – f.é.m., créé par le flux principal du rotor ;

$X$  – résistance inductive de l'ancre ;

$\sin \Theta$  – angle de phase entre la f.é.m.  $E_0$  et la tension  $U$ .

Sur la figure 12.6 on montre le diagramme vectoriel simplifié de l'alternateur (sans tenir compte de la chute de potentiel active dans l'ancre  $I \cdot R$ , puisque la résistance active de l'ancre est généralement très faible).

De la relation (12.6), on peut voir que le couple électromagnétique dépend de la f.é.m.  $E_0$ , de la tension  $U$  et de  $\sin \Theta$ . Le couple électromagnétique du générateur est de réaction, il équilibre le couple du moteur primaire (turbine à vapeur ou hydraulique). Pour MS le couple électromagnétique sera tournant. La condition obligatoire de conversion de l'énergie dans MS (mécanique à électrique dans un générateur et électrique à mécanique dans un moteur) est la présence du décalage de phase entre la f.é.m.  $E_0$  et la tension  $U$  sur l'angle  $\Theta$ . Lorsque  $\Theta = 0$  l'angle  $\psi = 90^\circ$ , puisque  $I_{m.a.v.}$  et  $I$  sont mutuellement perpendiculaires (voir fig. 12.6). Le couple électromagnétique  $M$  et la puissance  $P_{\text{эм}}$  en ce cas sont égal à zéro.

L'angle de phase  $\Theta$  sur le diagramme vectoriel des tensions de l'alternateur (voir la figure 12.6) correspond au déplacement spatial entre les axes du champ du rotor et le champ résultant sur l'angle  $\Theta/p$  au champ dépassant du rotor. Pour un moteur synchrone, au contraire, le champ du rotor est en arrière du champ résultant sur l'angle  $\Theta/p$ .

Si prendre que la f.é.m.  $E_0$  et la tension  $U$  sont constantes ne dépendent pas de la charge (ce mode est possible, par exemple, au fonctionnement parallèle d'une machine synchrone dans le réseau), alors le couple électromagnétique dépendra seulement de  $\sin \Theta$ . La dépendance du couple de l'angle  $\Theta$  est appelée **caractéristique angulaire de la machine synchrone** (fig. 12.7). On utilise cette caractéristique pour l'estimation de la stabilité statique d'une machine au fonctionnement parallèle avec le réseau électrique.

Comme il ressort de la formule (12.6) et le graphique (voir fig. 12.7), la machine développe le couple maximum lorsque  $\Theta = 90^\circ$ . Il est égal

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{x}. \quad (12.7)$$

La valeur de couple maximal, comme pour les MAS, caractérise la capacité de surcharge d'une MS. Il peut être considéré comme la limite de stabilité statique de la machine dans les conditions de son fonctionnement en parallèle avec le réseau. Moins le couple correspondant à cette charge par rapport au couple maximal, plus la marge de stabilité. Simultanément pour le fonctionnement stable il est nécessaire qu'à l'augmentation de l'angle  $\Theta$  augmentait le couple électromagnétique. Cette condition est respectée seulement à  $\Theta < 90^\circ$ .

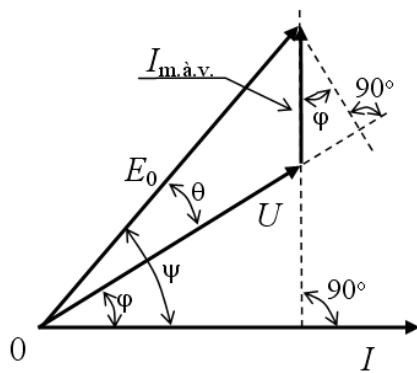


Figure 12.6 – Diagramme vectoriel de la GS

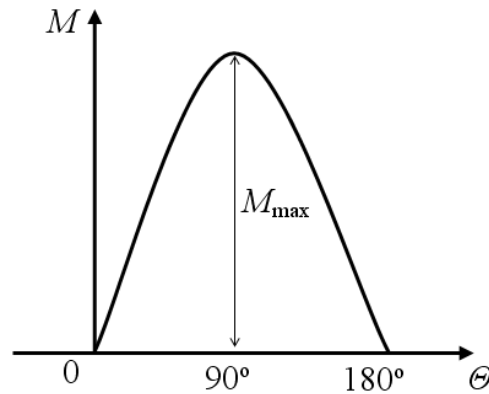


Figure 12.7 – Caractéristique angulaire de la MS

## 12.5 Fonctionnement de la MS en parallèle avec le réseau

Dans la pratique moderne, fonctionnement autonome des GS sur leur charge en dehors du lien avec d'autres sources de courant triphasé, se rencontre rarement. Généralement les consommateurs sont alimentés de système énergétique, qui rassemble les centrales électriques sur les lignes à haute tension pour leur fonctionnement en parallèle. La disponibilité du système énergie électrique donne les avantages économiques importants, dont les principaux sont l'augmentation de la sécurité d'alimentation et la réduction du coût de la production de l'énergie électrique.

Les puissances des systèmes énergétiques modernes sont calculées à des millions et des dizaines des millions kilowatt. Chacun des générateurs insérés dans un système énergétique, est en régime du fonctionnement parallèle avec un réseau général de grande puissance. Donc, on peut considérer que le mode d'un alternateur n'a pas d'incidence sur le mode de fonctionnement du réseau général, puisque **la fréquence et la tension sur ses bornes sont durement déterminés par le réseau extérieur et ne dépendent pas du courant inducteur, de la charge et de la puissance de cet alternateur.** Le moteur synchrone est toujours inclus en parallèle avec le réseau d'alimentation.

Lors de couplage du GS en parallèle avec le réseau il est nécessaire d'assurer probablement plus petit bond du courant au moment de couplage d'un alternateur sur le réseau. Le courant au moment de la connexion au réseau est égal à zéro, on satisfait la condition de l'égalité des significations instantanées des tensions du générateur et du réseau

$$U_m \sin(\omega_{\text{gén}} - \alpha_{\text{gén}}) = U_{m.\text{réseau}} \sin(\omega_{\text{réseau}} - \alpha_{\text{réseau}}), \quad (12.8)$$

où :

$U_m, U_{m.\text{réseau}}$  – valeur de l'amplitude de la tension du générateur et du réseau ;

$\omega_{\text{gén}}, \omega_{\text{réseau}}$  – fréquence du générateur et du réseau ( $\omega = 2\pi f$ ) ;

$\alpha_{\text{gén}}, \alpha_{\text{réseau}}$  – phases initiales du générateur et le réseau.

De (12.8) découlent les **conditions de couplage du GS sur le fonctionnement parallèle avec le réseau** : l'égalité des tensions  $U_m = U_{m.\text{réseau}}$  ;



l'égalité des fréquences  $\omega_{\text{gén}} = \omega_{\text{réseau}}$  ; l'égalité des phases initiales  $\alpha_{\text{gén}} = \alpha_{\text{réseau}}$ . En outre il faut coordonner l'ordre de la séquence des phases.

*La création des conditions indiquées avec le couplage du générateur au réseau est appelé **synchronisation**.*

Après le couplage d'un GS sur le réseau sa tension  $U$  devient égal à la tension du réseau  $U_{\text{réseau}}$ . Relativement de la charge extérieure les tensions  $U$  et  $U_{\text{réseau}}$  sont en phase, et sur la boucle « générateur – réseau » ils sont en opposition de phase, c'est-à-dire  $\dot{U} = - \dot{U}_{\text{réseau}}$ .

En vertu de l'équation des tensions le courant de l'ancre est défini par l'expression

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} . \quad (12.9)$$

Puisque les tensions du générateur et du réseau sont égales et sont en opposition de phase, on peut inscrire

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_{\text{réseau}}}{jX} . \quad (12.10)$$

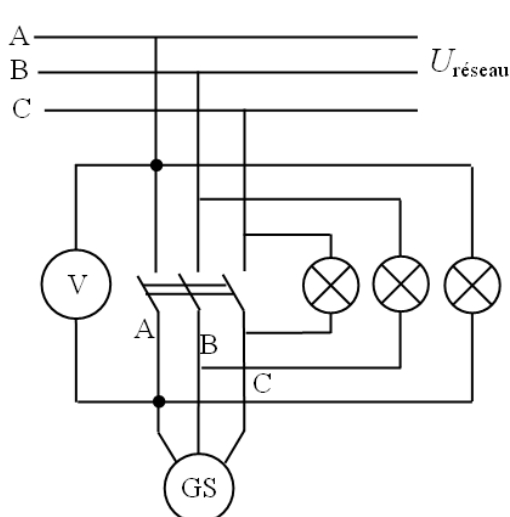
Le générateur après le couplage au réseau fonctionne en mode à vide. Le diagramme vectoriel correspondant à ce cas est représenté sur la figure 12.9, *a*. Lors de l'augmentation du courant d'excitation augmente la signification absolue de la f.é.m. de l'ancre  $E_0$ . Puisque la tension aux bornes du générateur est défini par le réseau et elle reste constante, alors apparaît la différence des tensions  $\Delta U = E_0 - U = E_0 + U_{\text{réseau}}$  qui provoquera le courant dans l'ancre

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX} . \quad (12.11)$$

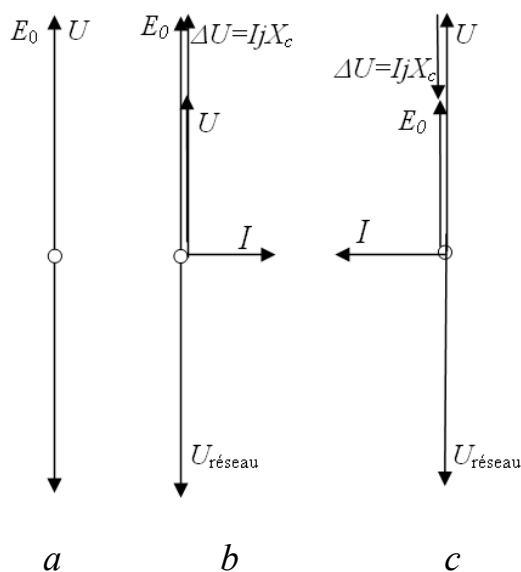
Le courant de l'ancre est en retard de phase par rapport à la  $\Delta U$  et  $E_0$  sur l'angle  $\psi = 90^\circ$  (fig. 12.9, *b*). Le mode obtenu est le même, comme si en mode de travail autonome du générateur il était chargé sur la charge purement inductive. Par rapport au réseau le générateur en ce mode est la source de la puissance réactive. À l'inverse, à la réduction du courant d'excitation (sous-excitation) la f.é.m.  $E_0$  baisse, ce qui provoque un changement de la phase  $\Delta U$  et du courant  $I$  sur opposé (voir fig. 12.9, *b*). Le courant de l'ancre en ce cas est en avance de phase par rapport à la tension  $U$  et la f.é.m.  $E_0$  sur l'angle  $90^\circ$ , et par rapport à la tension du réseau  $U_{\text{réseau}}$  sera en retard de phase sur le même angle.

Dans ce mode, le générateur consomme du réseau la puissance réactive nécessaire pour maintenir la valeur de champ résultant sur le même niveau, puisque la tension aux bornes est durement donnée. La réaction d'induit sera longitudinale démagnétisante. La charge sur le moteur primaire dans les deux cas reste au niveau marche à vide, de sorte que la puissance électromagnétique lorsque  $\psi = 90^\circ$  est égale à zéro.

Ainsi, la régulation du courant d'excitation entraîne seulement le changement de la charge réactive de l'alternateur.



**Figure 12.8** – Schéma de couplage d'un GS au réseau



**Figure 12.9** – Diagrammes vectoriels

Pour charger une génératrice de la puissance active, il est nécessaire d'influencer sur le moteur primaire pour donner au rotor une certaine accélération. À cette fin, on augmente l'aspiration de la vapeur ou de l'eau dans la turbine. Lors de l'accélération du rotor apparaît un déphasage entre la f.é.m.  $E_0$  et la tension  $U$  à l'angle  $\Theta$ , qui est une conséquence de cisaillement spatiale entre les axes du champ du rotor et le champ résultant sur l'angle  $\frac{\theta}{p}$ .

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX} \quad (12.12)$$

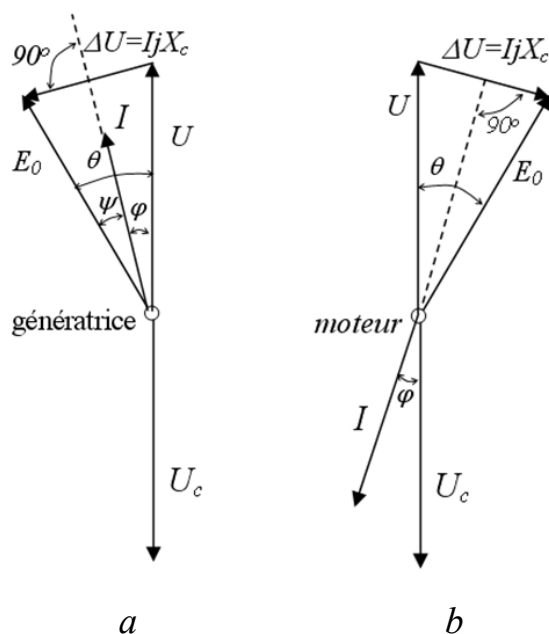
Ce courant, en retardant par phase sur  $90^\circ$ , aura un décalage de phase par rapport à la f.é.m. sur l'angle  $\psi < 90^\circ$  (fig. 12.10, a).

Puisque  $\Theta > 0$ , et  $\psi < 90^\circ$ , la génératrice développera la puissance électromagnétique entrant au réseau  $P_{\text{él.mag.}} = m \cdot E_0 \cdot U \cdot \cos \psi > 0$ , et le couple électromagnétique

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.13)$$

qui équilibrerait le couple du moteur primaire lors de la précédente vitesse de rotation (synchrone vitesse).

Avec l'augmentation du couple du moteur primaire augmenteront l'angle  $\Theta$ , la puissance électromagnétique et le moment résistant. La vitesse de rotation sera maintenue synchrone jusqu'à ce que le couple du moteur primaire sera équilibré par le couple électromagnétique du générateur. Lorsque l'angle  $\Theta = 90^\circ$  le couple électromagnétique est maximal (voir le rapport 12.7). Sa valeur est cette limite de la charge du générateur par le couple (en conséquence et par la puissance rendue), dont le générateur encore capable de fonctionner synchronement avec le réseau. Si le couple du moteur primaire dépasse cette signification, le générateur ne pourra pas l'équilibrer et tombe du synchronisme. Le travail parallèle avec le réseau devient impossible.



**Figure 12.10** – Diagrammes vectoriels d'un MS :  
a – mode génératrice ; b – mode moteur

Si après le couplage en parallèle de la machine synchrone ne pas augmenter le couple tournant du moteur d'entraînement, mais, au contraire, le diminuer ou même mettre à l'arbre le couple de freinage, le rotor sera ralenti un peu et sera en arrière sur le champ résultant sur l'angle  $\Theta/p$ . En ce cas la f.é.m.  $E_0$  sera en arrière sur la tension  $U$  sur l'angle  $\Theta$ . Cela provoquera le changement de la phase  $\Delta U$  et du courant de l'ancre presque sur opposé (fig. 12.10, b). En conséquence de cela le sens du flux électromagnétique et du couple électromagnétique changera et le couple de résistant deviendra tournant.

La machine passera en mode du moteur synchrone (MS). Le couple électromagnétique équilibrera le couple de freinage (couple résistant) et la vitesse de la rotation restera synchrone.

Ainsi, la machine synchrone coupler en parallèle avec le réseau de grande puissance, résiste dans la limite de sa stabilité statique comme à l'accélération, et au ralentissement du rotor et maintient la vitesse de rotation constante. C'est seulement l'angle entre les axes du champ du rotor et le champ résultant qui change dans les limites  $\pm 90$  degrés électriques. Pour un fonctionnement stable les machines synchrones sont conçus et fabriqués de telle sorte que lorsque la charge nominale l'angle  $\Theta$  est généralement inférieure à  $20 \pm 30^\circ$ . La machine synchrone résiste aussi au changement du courant d'excitation de la variation correspondante de charge réactive, puisque la tension aux bornes est durement donné.

## 12.6 Moteur synchrone

Dans le moteur synchrone (MS) l'énergie électrique du courant alternatif provenant du réseau sur le stator se transforme à l'énergie mécanique sur l'arbre. Par son concept MS est similaire à GS. À la base de la création du couple du moteur synchrone est l'interaction du courant alternatif du stator avec le champ magnétique constant du rotor.

Pour déterminer les particularités de cette interaction nous nous servirons de la figure 12.11 qui montre les éléments de l'arc du stator et du rotor. Soit à un moment donné le sens du courant dans les conducteurs du stator et de la position des pôles correspondent à la figure 12.11, a. En vertu de la règle de la main gauche [36, 73] chacun des conducteurs du stator subira une force mécanique de

l'interaction de son courant avec le champ du rotor dirigé contre la petite aiguille. La force agissant sur les pôles du rotor, sera opposée Dans la demi-période du courant alternatif  $T/2$  dans les conducteurs du stator s'établira le même courant qui a le sans opposé.

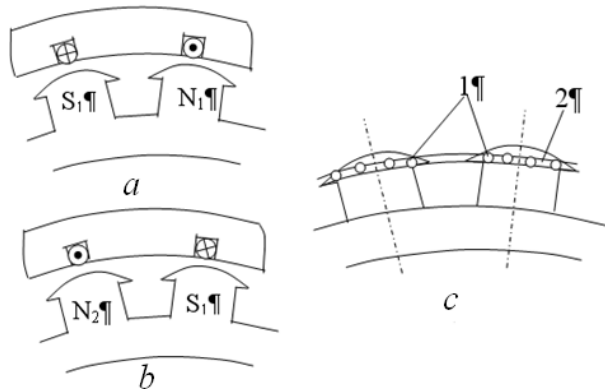


Figure 12.11 – Principe fonctionnement d'une MS

Pour que le sens de la force agissant sur le rotor reste le même il est nécessaire que pour le même temps le rotor est tourné sur un pôle et a pris la position montrée sur la figure 12.11, b. Toutefois, en raison de l'inertie le rotor pour un temps  $T/2$  et à la fréquence  $f = 50$  Hz reste pratiquement sur place et donc dans la prochaine demi-heure la force de la direction inverse y agira. Comme conséquence, la machine ne peut pas

indépendamment de faire un demi-tour. Mais si aux frais de la force extérieure donner au rotor préalablement une telle vitesse à laquelle on assure la condition indiquée, le moteur pourra continuer à tourner à la vitesse synchrone grâce à son propre couple électromagnétique. Si le rotor a  $p$  de paires de pôles, le temps d'une rotation complète sera  $pT$  des secondes, et la vitesse de la rotation

$$\omega = \frac{2\pi}{p \cdot T} = \frac{2\pi \cdot f}{p}. \quad (12.14)$$

Le sens de la rotation d'un MS triphasé est définie par l'alternance des phases du réseau d'alimentation.

Ainsi, le travail du moteur s'effectue à la vitesse synchrone et ne dépend pas de la charge de la vitesse de rotation. Les changements de la charge se font sentir seulement sur l'angle de décalage spatial entre les axes du champ d'induit et du champ du rotor. À la différence de l'alternateur le rotor du MS est en arrière sur le champ résultant de l'ancre sur  $\Theta$  des degrés électriques. Dans un moteur, le champ de l'ancre est dirigeant et le rotor le suit.

Le couple électromagnétique de MS s'exprime de la même formule, que le couple de GS, i.e.

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta. \quad (12.15)$$

Si le couple résistant de la charge dépasse la valeur maximale (lorsque  $\Theta = 90^\circ$ ), l'équilibre des moments s'avère impossible; le moteur tombe du synchronisme et s'arrête. À la vitesse de la rotation moins que la vitesse synchrone sont inévitables les positions du rotor, quand  $360 > \Theta > 180$ . De plus le couple du moteur changera la direction et ralentira encore plus le rotor, en accélérant son arrêt.

Pour coupler un MS au réseau, il faut tout d'abord le synchroniser en réseau. Les exigences sont les mêmes que lors de l'activation en parallèle des générateurs.

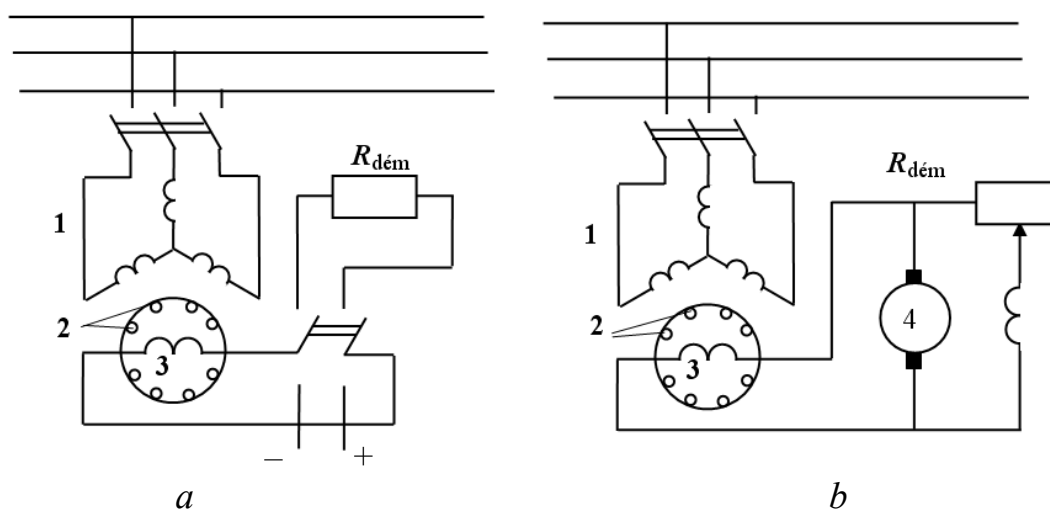
Pour donner au rotor du moteur synchronisé la vitesse synchrone avant le couplage au réseau, il faut avoir un moteur spécial. Cet inconvénient dans une

grande mesure limitait l'application du MS. Les MS modernes habituellement sont lancées de manière asynchrone de démarrage, dans lequel le moteur d'entraînement n'est pas nécessaire.

## 12.7 Démarrage des moteurs synchrones

Pour le démarrage indépendant (sans moteur d'entraînement) dans le rotor de MS on installe un bobinage spécial de mise en marche à cage d'écureuil. Ses éléments sont présentés sur la figure 12.11, *c*. Il comprend les barreaux 1, qui entrent dans les rainures prévues pour cela, les pièces polaires et deux anneaux de fixation 2 aux extrémités du rotor par qui les barreaux se lient entre eux-mêmes. On fabrique les barreaux du laiton, de la bronze d'aluminium et d'autres alliages à la résistance spécifique augmentée. Parfois on se passe sans le bobinage de démarrage, mais dans ce cas les pièces polaires aux extrémités sont électriquement reliés par les appliques, formant un contour à court-circuit, qui joue le rôle de la cage de démarrage. Dans les moteurs rapides à pôles lisses la fonction de la cage d'écureuil accomplissent les couches superficielles du cardiaque massif cylindrique du rotor. Dans ce cas le MS se lance dans la course par le démarrage asynchrone. Le schéma de ce démarrage est représentée sur la figure 12.12, *a*.

Le stator du moteur 1 (fig. 12.12, *a*) est inclus dans le réseau de courant triphasé à la pleine tension (démarrage direct) ou en basse tension, s'il est nécessaire de diminuer l'influence du courant de démarrage. Le champ magnétique tournant du stator induit dans le bobinage de démarrage à court-circuit 2 la F.E.M. et le courant, qui en interagissant avec le champ crée un couple de rotation. Le rotor vient à la rotation, comme dans une MAS. Grâce au couple asynchrone il atteint la vitesse de rotation à laquelle le glissement n'excède pas d'habitude 0,05. L'exécution du bobinage de démarrage avec la résistance augmentée permet d'obtenir la couple de démarrage suffisante. En temps d'accélération du rotor jusqu'à le glissement indiqué ( $g = 0,05$ ) le bobinage d'excitation 3 est fermé sur une résistance externe  $R_{\text{dém}}$ , qui doit être à 10–15 fois plus de sa résistance propre.



**Figure 12.12** – Schémas du démarrage de moteur synchrone :  
*a* – avec un rhéostat de démarrage ; *b* – avec un exciteur

Cela est nécessaire parce que le champ tournant induit aussi dans le bobinage d'excitation la f.é.m., qui au moment initial de démarrage peut-être importante, dangereuse pour l'isolation du bobinage et pour le personnel. Quand le rotor atteindra la vitesse proche de la synchrone ( $g \approx 0,05$ ), le bobinage de l'excitation passe à l'alimentation par le courant continu d'excitateur. Dans ce cas, outre le couple asynchrone, proportionnel au glissement, apparaît un couple synchrone de l'interaction entre le courant d'induit avec le champ magnétique constant du rotor, qui dépend du courant d'excitation (f.é.m.  $E_0$ ) et de l'angle  $\Theta$ .

En raison de glissement l'angle  $\Theta$  change sans cesse, et dans les intervalles de temps, quand  $0 < \Theta < 180^\circ$ , le couple synchrone est plié avec le couple asynchrone, ce qui accélère le rotor et le glissement diminue. Lors de la réalisation de  $g = 0$  le moteur après quelques oscillations près de la vitesse synchrone entre dans le synchronisme et continue à travailler comme synchrone. Ce faisant, l'angle  $\Theta$  est plus grand que zéro et moins que  $90^\circ$ . Dans le mode de fonctionnement le courant et la f.é.m. du bobinage de démarrage sont égaux à zéro, son couple asynchrone aussi est égal à zéro puisque le rotor tourne à la vitesse synchrone. Cependant, lors du changement de la charge, quand il y a un changement de l'angle  $\Theta$  et de l'angle entre les axes des champs  $\Theta/p$ , la cage de démarrage a un effet positif, en réduisant l'oscillation du rotor près de la nouvelle position correspondant à la charge changée.

On applique aussi le démarrage asynchrone du MS avec un excitateur connecté hermétiquement (voir fig. 12.12, *b*). Dans ce cas le bobinage de l'excitation 3 est connecté à l'ancre d'excitateur 4 monté sur l'arbre du moteur, dès le début de la mise en marche. Dans la mesure de la dispersion le moteur s'excite et, à l'acquisition de la vitesse proche de synchrone, entre dans le synchronisme. Un tel moyen demande moins de l'équipement de démarrage pour la gestion et l'automatisation de la mise en marche.

Le démarrage asynchrone du MS a les mêmes inconvénients que le démarrage du MAS à cage, dont le principal est le grand courant de démarrage. Pour limiter le courant de démarrage des grands moteurs on utilise la réduction à la période de démarrage de la tension appliquée sur le stator, à l'aide des réacteurs (résistances inductives), inséré successivement au chaîne du stator (démarrage par réactances) ou à l'aide des autotransformateurs (démarrage par autotransformateur). La gestion de la mise en marche du MS dans les installations modernes est généralement automatisé.

## 12.8 Réglage du facteur de puissance des moteurs synchrones

Dans la section 12.5 il a été noté que lors de la régulation du courant d'excitation de la MS, activée en parallèle avec le réseau, change la puissance réactive. Le changement de la puissance réactive quand la puissance active est stable signifie aussi le changement du facteur de puissance  $\cos\varphi$ . Il vient d'ici la possibilité de régulation du facteur de puissance d'une MS par le courant d'excitation du rotor.

Nous expliquerons cela à l'aide des diagrammes vectoriels de MS (fig. 12.13). Soit à la charge donnée le courant inducteur est établi de sorte que l'angle  $\varphi = 0$ ,  $\cos\varphi = 1$ , le courant du stator et la tension sont en phase. Nous appellerons ce courant d'excitation comme le courant normal.

Le diagramme vectoriel correspondant à ce régime est représenté sur la figure 12.13 par les vecteurs :

$$\overline{U_c} = \overline{OB}; \quad -\overline{E_0} = \overline{OA}; \quad \overline{I} \cdot X = \overline{AB}; \quad \overline{I} = \overline{OC}.$$

Si, sans changer la charge sur l'arbre, changer le courant inducteur, changera la f.é.m. de l'ancre  $E_0$  et l'angle  $\theta$ , mais

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0' \cdot U}{X} \sin \theta' \quad (12.16)$$

restera invariable, c'est-à-dire

$$E_0 \sin \theta = E_0' \sin \theta = E_0'' \sin \theta'' = \text{const} . \quad (12.17)$$

Par conséquent la fin du vecteur  $-E_0$  au changement du courant d'excitation se déplace en ligne droite  $A'A''$ , parallèle au vecteur de tension  $U_c$ . Ce qui conduit au changement de la valeur et de la phase de la chute de tension inductive  $I \cdot X$  et du courant statorique  $I$ . De sorte que  $I \cdot X \cdot \cos\varphi = E_0 \cdot \sin\Theta = \text{const}$ , alors et  $I \cdot \cos\varphi = \text{const}$ .

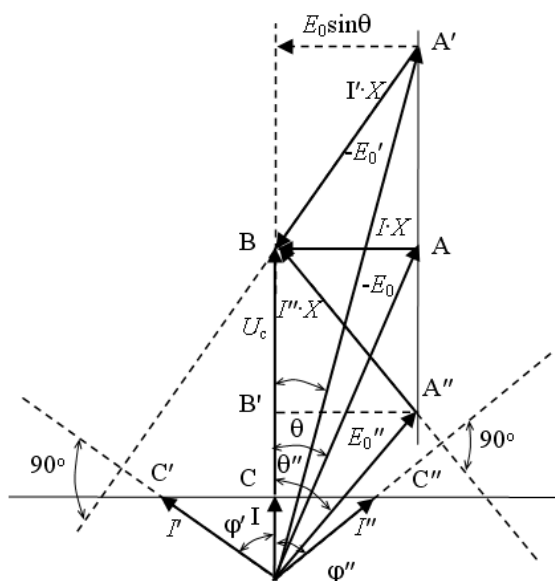
Donc, la composante active du courant statorique reste l'invariable. La fin du vecteur du courant  $I$  au réglage du courant d'excitation se déplace en ligne droite  $C'C''$ , qui est perpendiculaire au vecteur de la tension  $U_c$  (voir fig. 12.13).

Ainsi, aux frais du courant d'excitation il est possible de donner à la MS n'importe quel mode selon le facteur de puissance. À l'augmentation du courant d'excitation en comparaison du courant normal le courant du stator est en avance sur la tension. Par rapport au réseau le moteur se comporte comme une charge activement-capacitive. Dans ce cas le moteur est dans un état de **surexcitation**.

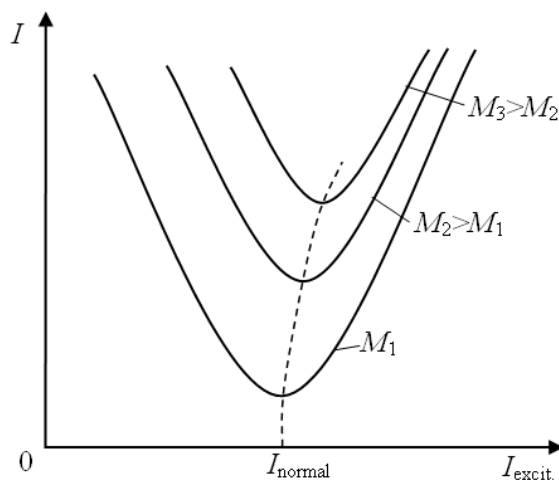
Le diagramme vectoriel (voir fig. 12.13), présenté par les vecteurs  $-E_0'$ ,  $I' \cdot X$ ,  $U_c$  et  $I'$  correspond au moteur surexcité. Au contraire, à la réduction du courant d'excitation (**sous-excitation**) le moteur consomme le courant en retard sur la tension et représente une charge active-inductive du réseau (les vecteurs  $I''$ ,  $E_0''$ ,  $I'' \cdot X$ ). Le plus grand intérêt présente le mode de fonctionnement normal avec  $\cos\varphi = 1$  et le régime **surexcitation**, quand le moteur consomme le courant en avance sur la tension. Dans ce dernier cas grâce à la composante réactive (capacitive) du courant du moteur on atteint l'augmentation  $\cos\varphi$  au réseau, puisque la charge principale du réseau a le plus souvent le caractère active-inductif.

Les MS sont généralement calculés pour un fonctionnement à la charge nominale en mode sous-excitation avec  $\cos\varphi = 0,8$ . Au changement du courant d'excitation change non seulement la phase, mais aussi la valeur du courant statorique. La dépendance du courant statorique du courant d'excitation à la charge donnée est représentée par une courbe en forme de U (fig. 12.14). Le minimum du courant du stator a lieu au courant d'excitation normal, quand  $\cos\varphi = 1$ . Avec

la croissance de la charge le minimum des courbes en forme de U se déplace dans la direction des plus grands courants d'excitation.



**Figure 12.13** – Diagrammes vectoriels d'un MS



**Figure 12.14** – Dépendance du courant du stator d'un MS du courant d'excitation

Lors de la réduction de la charge mécanique sur l'arbre la composante active du courant du stator diminue, ce qu'élargit la gamme possible du réglage de la composante réactive. MS à vide sans charge peut être utilisé à titre de la source réglée de la capacité réactive du réseau. Pour tels buts on applique, cependant, les MS spéciaux, qui s'appellent les **compensateurs synchrones**.

Le compensateur synchrone, à la différence du moteur et de l'alternateur n'éprouve pas les charges mécaniques et donc il est calculé seulement sur une petite puissance mécanique liée aux pertes de la marche à vide. Les compensateurs synchrones sont appliqués dans les réseaux électriques pour la régulation de la tension.

## 12.9 Caractéristiques de fonctionnement des moteurs synchrones

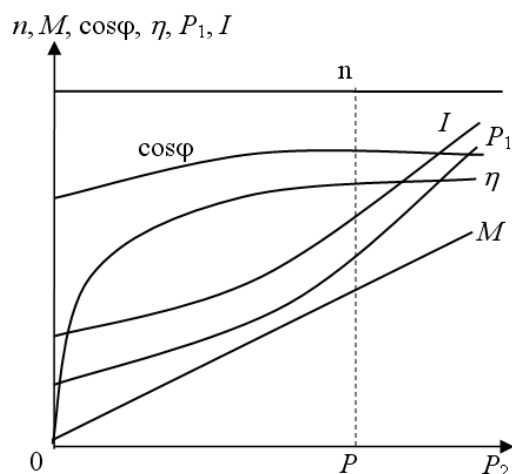
Les caractéristiques de fonctionnement d'un MS ce sont les dépendances de la vitesse, du couple sur l'arbre, du facteur de puissance  $\cos\varphi$ , du rendement, de la puissance consommée et du courant consommé de la puissance utile  $P_2$ , retirée de l'arbre du moteur, aux tension du réseau et le courant d'excitation constantes. Les graphiques des dépendances sont représentés sur la figure 12.15.

Puisque la vitesse de rotation du moteur est constante, la caractéristique de vitesse  $n = f(P_2)$ , ainsi que la caractéristique mécanique  $n = f(M)$ , est représenté par une droite parallèle à l'axe des abscisses, et la ligne du couple sur l'arbre  $M$  – par la ligne droite passant par le début des coordonnées.

Le caractère de la dépendance  $\cos\varphi = f(P_2)$  est conditionné par le courant d'excitation du moteur. Si aux frais du courant d'excitation définir  $\cos\varphi = 1$  à la



charge nominale, alors au sous-charge le moteur consommera le courant en avance de phase (surexcitation), et à la surcharge – le courant en retard (sous-excitation). Dans les deux cas le facteur de puissance baisse.



**Figure 12.15** – Caractéristiques de fonctionnement d'un MS

La courbe de rendement est de la même forme que pour un MAS. Dans le domaine des charges de  $0,3$  à  $1,3 \cdot P_{\text{nom}}$  le changement de rendement est faible. La caractéristique  $\eta = f(P_2)$  définit une dépendance de la consommation de puissance  $P_1 = f(P_2)$ , parce que  $P_1 = P_2 / \eta$ . À son tour de  $P_1 = f(P_2)$  et  $\cos\varphi = f(P_2)$  découle la dépendance pour le courant que stator consomme du réseau,  $I = f(P_2)$ , de sorte que

$$I = \frac{P_1}{m \cdot U \cdot \cos\varphi}.$$

## 12.10 Comparaison des moteurs synchrones et asynchrones

Selon sa constitution un MS il est plus complexe qu'un MAS, son coût est plus grand. La différence relative des coûts est plus haute en cas des faibles puissances des machines. Pour son fonctionnement les MS ont besoin deux types de courant. Il faut marquer qu'à présent à côté d'excitation d'électromachine les moteurs avec l'auto-excitation du réseau d'alimentation du courant alternatif par les redresseurs demi-conducteurs reçoivent une large application.

Selon les propriétés de démarrage les moteurs synchrones et asynchrones sont presque identiques. Le premier est moins sensible aux variations de la tension du réseau, puisque son couple, y compris maximum, est proportionnel au premier degré de la tension. Le deuxième a cette dépendance quadratique. En outre, en utilisant dans les cas nécessaires le forçement (augmentation) automatique du courant d'excitation du MS, il est possible de maintenir la stabilité de son travail même aux réductions considérables de courte durée de la tension du réseau. Quant à la régulation de la vitesse de rotation MS cède à MAS, bien que l'on ne peut pas considérer les propriétés régulatrices du dernier aussi bon.

L'avantage principal du MS est la possibilité de son travail avec  $\cos\varphi = 1$  ou même avec le courant statorique en avance (capacitif). Cet avantage est particulièrement essentiel pour les moteurs, calculées sur une petite vitesse de la rotation, puisque les MAS aux petites vitesses ont les caractérisés avec un faible facteur de puissance.

Selon l'ensemble des propriétés les MS d'une puissance d'environ 100 kW et plus sont compétitifs ou même surpassent les MAS. Et dans certains cas est souhaitable d'appliquer les MS de plus faible puissance.

## Conclusions principales

1. Machine synchrone est convertible. Elle peut être utilisée à titre de générateur, ainsi qu'à titre de moteur.
2. Dans un générateur synchrone il y a une transformation de l'énergie mécanique à l'énergie électrique du courant alternatif triphasé. À l'industrie on utilise deux principaux types de générateurs synchrones – les turbo-génératrices et les générateurs hydrauliques.
3. La fréquence de la f.é.m. du générateur est déterminée par la vitesse de rotation et par le nombre de paires de pôles du rotor. La vitesse demandée pour la fréquence donnée de la rotation du rotor est moins, plus est le nombre de paires de pôles  $p$ . Les générateurs, travaillant des moteurs primaires à faible vitesse, sont multipolaires.
4. La caractéristique extérieure du générateur caractérise la dépendance de la tension du courant de la charge  $U = f(I)$  à  $n = \text{const}$ ,  $I_{d'excit.} = \text{const}$  et  $\cos\varphi = \text{const}$ . Pour maintenir la tension de l'alternateur constante lors du changement de la charge par la valeur et par le caractère on règle le courant d'excitation du rotor.
5. Le générateur synchrone a le couple électromagnétique de réaction; il équilibre le couple du moteur primaire.
6. Le couple électromagnétique d'un moteur synchrone est tournant.
7. La condition obligatoire de conversion de l'énergie dans MS (mécanique à électrique dans un générateur et électrique à mécanique dans un moteur) est la présence du décalage de phase entre la f.é.m.  $E_0$  et la tension  $U$  sur l'angle  $\Theta$ .
8. Lors de couplage du GS en parallèle sur le réseau il est nécessaire d'assurer l'égalité des fréquences et l'égalité des tensions
9. La charge réactive du générateur est réglée par le courant d'excitation.
10. Dans un MS l'énergie électrique du courant alternatif, entrant du réseau sur le stator, se transforme à l'énergie mécanique sur l'arbre de la machine.
11. On fait démarrer le MS par la méthode de démarrage asynchrone, pour quoi dans son rotor est posé un bobinage spécial en court-circuit de mise en marche.
12. En changeant le courant d'excitation on peut définir au MS n'importe quel régime selon le facteur de puissance. Lors l'augmentation du courant d'excitation (mode surexcitation) le moteur par rapport au réseau se comporte comme une charge active-capacitive. En cas de la réduction du courant d'excitation (sous-excitation) le moteur représente pour réseau une charge active-inductive.

## Questions pour la maîtrise de soi

1. Quelle est la particularité principale de la MS et quel est la domaine de sa utilisation ?
2. Quelles sont les parties principales d'une MS ? Leur destination ?

3. Quelles sont les différences dans la construction du noyau magnétique et du bobinage d'une MS en comparaison d'une MAS ?
4. En quoi consiste le principe du fonctionnement du générateur synchrone ?
5. Quelles sont les différences constructives entre un générateur hydroélectrique et une turbo-génératrice ?
6. Qu'entend-on par caractéristique à vide du générateur ?
7. Sur la base des quelles données on construit la caractéristique à vide du générateur ?
8. Qu'entend-on par caractéristique extérieur du générateur synchrone et comment elle dépend du caractère de la charge ?
9. Qu'entend-on par la puissance électromagnétique du générateur et du moteur ? Quel est le rôle du couple électromagnétique dans un générateur et dans un moteur ?
10. Que représente la caractéristique angulaire ? Quelle plage de l'angle  $\Theta$  est limitée par sa partie stable ?
11. Expliquez les conditions de couplage du GS sur le fonctionnement parallèle avec un réseau électrique ?
12. Comment le réglage du courant d'excitation influence-t-il sur le mode de fonctionnement d'une MS ?
13. Comment change la charge active du générateur, inséré en parallèle d'un réseau de grande puissance ?
14. À quelles conditions une MS passe en mode d'un GS ? Dans quelle gamme des charges une MS, inséré en parallèle d'un réseau électrique, fonctionne de manière stable ?
15. Quelle est l'influence de courant d'excitation du rotor sur le facteur de puissance d'un MS ? Analysez cette influence à l'aide d'un diagramme vectoriel.
16. Pour quels buts on utilise les compensateurs synchrones et dans quoi consiste leur différence des machines synchrones ordinaires ?
17. Quelles sont les dépendances qu'on appelle les caractéristiques de fonctionnement d'un MS et quelle est leur caractère ?
18. Donnez l'estimation comparative des propriétés électromécaniques d'un MS par rapport à d'un MAS.
19. Quel est la domaine rationnel d'utilisation du MS ?

## Cinquième parti : ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE ET COMMANDE ÉLECTRIQUE

---

---

Electronique industrielle est une branche de la science et de la technologie qui s'occupe de l'étude de la constitution et de fonctionnement de différents appareils électroniques et leurs applications dans l'industrie. Aujourd'hui l'électronique a pénétré dans tous les secteurs de la science, de la technologie et de l'industrie. Les appareils électroniques sont utilisés dans l'automatique, la télémécanique, la communication, la médecine, la physique, l'ingénierie, l'industrie de la construction, etc.

La commande électrique, décidant les tâches de la gestion des électromoteurs de divers types et destinations, est devenu l'un des principaux domaines d'utilisation efficace des éléments de l'électronique industrielle. Une large utilisation industrielle des thyristors a conduit à des progrès significatifs dans le domaine de la commande électrique réglable à courant continu et alternatif. On a créé les installations de grande efficacité, qui convertissent le courant de la fréquence industrielle au courant alternatif de la fréquence réglable pour la gestion de la vitesse des électromoteurs.

Les amplificateurs électroniques, les redresseurs, les appareils de mesure et d'autres appareils sont devenus un puissant moyen pour l'automatisation et le contrôle des processus de production. L'utilisation des appareils semi-conducteurs commandés dans les schémas traditionnels augmente considérablement leurs possibilités dans la garantie des nouveaux modes et, donc, les nouvelles propriétés fonctionnelles de l'équipement élaboré à leur base.

### Chapitre 13 : BASES DE L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

**Notions clés :** diode,  $f$  ; valve,  $f$  ; redresseur,  $m$  ; thyristor,  $m$  ; transistor,  $m$  ; émetteur,  $m$  ; base,  $f$  ; collecteur,  $m$  ; filtre,  $m$  ; amplificateur,  $m$  ; bande passante,  $f$  ; coefficient d'amplification,  $m$ .

Le progrès moderne scientifique et technique dans de nombreux secteurs de l'industrie, en particulier dans la construction, est lié au développement de l'électronique. Les succès de l'électronique sont le résultat de la création des divers appareils semi-conducteurs. À l'heure actuelle le nombre des divers types des appareils de l'électronique est si grand que leur considération complète sort du cadre du programme de notre cours. Par conséquent, l'examen est limité par les types principaux de dispositifs à semi-conducteurs qui ont obtenu une large application dans nombreuses installations, en particulier dans les systèmes de gestion des commandes électrique des machines et des mécanismes de chantier.

On distingue l'électronique de puissance et l'électronique de faibles tensions. Une des tâches principales de l'électronique de puissance est la conversion de différentes sortes d'énergie électrique, en particulier le courant alternatif au courant continu. L'électronique de faibles tensions est utilisée principalement pour la décision des problèmes de la gestion de signaux électriques, permettant de transmettre ou recevoir des informations.

Dans le cadre du sujet donné on examine les questions de l'installation et les principes de fonctionnement des appareils semi-conducteurs (des diodes, des thyristors et des transistors) et leur application dans les redresseurs et les amplificateurs.

### **13.1 Éléments de la technique de semi-conducteurs**

**13.1.1 Le principe de fonctionnement des appareils à semi-conducteurs** est fondé sur le phénomène de la conductibilité unipolaire de la frontière entre deux semi-conducteurs différents types de conductibilité électrique : par électrons (conductibilité électrique de type N) et par trous (conductibilité électrique de type P). Le domaine de la conductibilité électrique de type N se caractérise en ce que le passage du courant se passe ici grâce au transfert des électrons négativement chargés, dont la quantité excédentaire est créée par voie de l'introduction au monocrystal du semi-conducteur des impuretés donatrices, par exemple de l'antimoine, l'arsenic, le phosphore. Dans le domaine de la conductibilité électrique de type P le passage du courant est conditionné par le transfert «des trous» positivement chargés (le trou est un atome, auquel il ne suffit pas un électron et lequel, donc, possède la charge positive, par la valeur absolue égal à la charge d'un électron). Les trous résultent par voie de l'introduction au monocrystal du semi-conducteur des impuretés acceptrices, par exemple de l'indium, la forêt, l'aluminium.

En outre, dans les semi-conducteurs impuretés toujours à côté des porteurs principaux, dont la concentration est grande, il existe également les porteurs non principaux : les trous dans les semi-conducteurs de type N et les électrons dans les semi-conducteurs de type P. Dans les semi-conducteurs sans impuretés le nombre des électrons est toujours égal au nombre des trous.

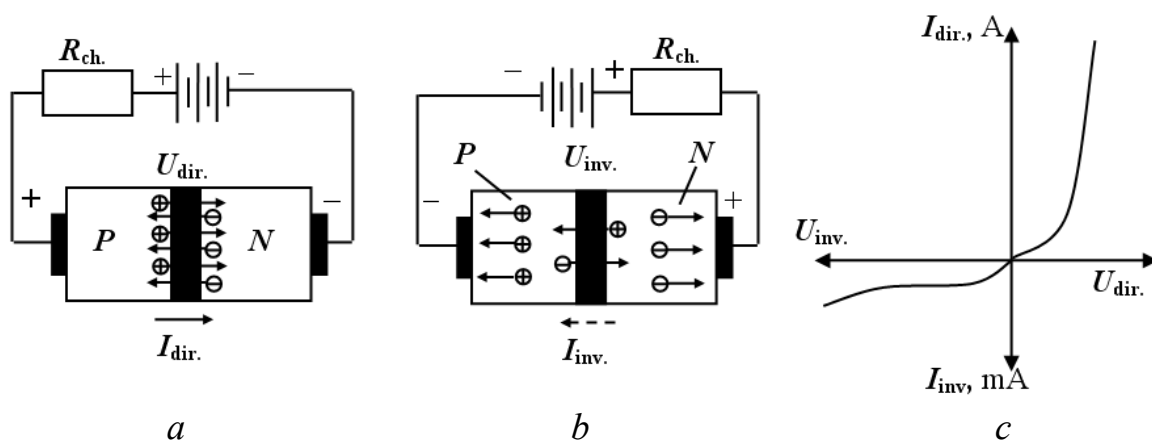
En cas de contact direct de deux semi-conducteurs, dont l'un a de la conductibilité par électrons et l'autre – conductibilité par trous, on reçoit une jonction P-N (on dit encore le passage P-N), dont la propriété principale est la dépendance de la valeur de sa résistance de la polarité de tension appliquée. Pour l'adjonction à la chaîne extérieure des zones P-N du semi-conducteur on crée les contacts ohmiques (voir le site Wikipédia [74]) avec les bornes.

Nous examinerons à l'exemple du cristal bicouche du silicium (à deux zones P et N) les procès se passant au passage P-N à l'influence sur lui d'une tension externe. Si au zone P mettre le potentiel positif et au zone N – négatif, les porteurs principaux du courant avanceront dans la zone jonction à la rencontre l'un à l'autre (fig. 13.1, *a*). Finalement la résistance du passage P-N

diminue et dans la frontière de la jonction passe le courant direct  $I_{\text{dir.}}$ , limité pratiquement seulement par la résistance de la charge  $R_{\text{ch.}}$ . La tension externe  $U_{\text{dir.}}$  d'une telle polarité est appelée direct ou passant.

Au changement de la polarité de la tension appliquée (fig. 13.1, *b*) les trous dans la zone P et les électrons dans la zone N du semi-conducteur s'éloigneront de la jonction ce qui conduit à une augmentation de la résistance du passage P-N, et le flux des porteurs principaux réduit à zéro. Par le passage P-N passe le courant insignifiant créé par les porteurs non principaux, pour lesquels la différence des potentiels appliquée est accélérante. La tension externe d'une telle polarité s'appelle inverse  $U_{\text{inv.}}$  ou fermant, et un petit courant conditionné par cette tension – le courant inverse  $I_{\text{inv.}}$ .

Ainsi, la valeur et le sens du courant passant par un passage P-N de la structure bicouche semi-conductrice dépendent de la signification et le signe de la tension externe, c'est-à-dire le passage P-N possède des propriétés de redressement.



**Figure 13.1** – Passage du courant à travers la jonction P-N du semi-conducteur :  
*a* – état ouvert (passant) ; *b* – état fermé (non-conducteur) ; *c* – caractéristique de volt-ampère

La dépendance du courant  $I$  passant par la jonction P-N de la tension appliquée est appelée **caractéristique volt-ampère de la jonction**. Cette caractéristique a deux branches (fig. 13.1, *c*) : une est disposé dans le premier quadrant et correspond à la direction passant de la jonction P-N (passage du courant direct), deuxième – dans le troisième quadrant et caractérise les propriétés fermant du passage.

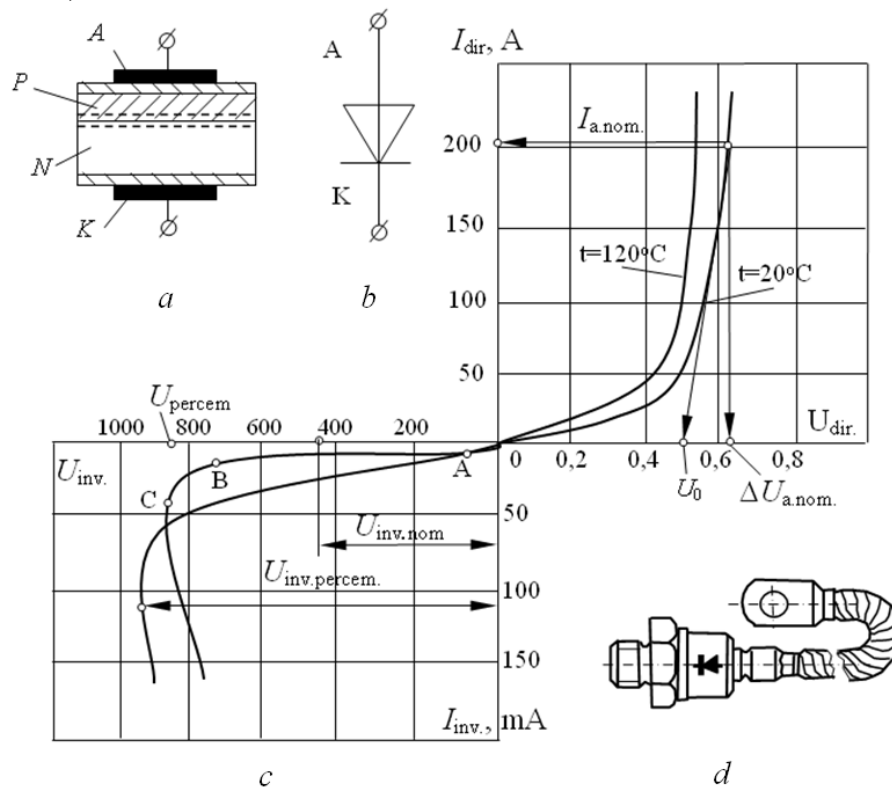
**13.1.2 Diodes non commandés.** Dans les dispositifs de l'électronique industrielle sont utilisés des diodes non commandés de silicium, de germanium et de séléniques. Parfois on les appelle les valves.

**Diodes au silicium.** Nous examinerons la conception et la caractéristique courant-tension d'une diode au silicium (voir la figure 13.2). Le matériau initial de ces diodes est les disques fins découpés du monocristal du silicium avec le type électronique de la conductibilité électrique, à qui par fusion de l'aluminium ou de diffusion dans le silicium des atomes de l'aluminium ou de bore crée une couche à conductivité de type P.

Le disque de silicium avec le passage P-N est soudé entre les plaques de molybdène (fig. 13.2, *a*), ayant presque le même coefficient de la dilatation

linéaire, comme le silicium, et une bonne conductibilité thermique. L'électrode reliée à la couche du semi-conducteur avec la conductibilité électrique du type N, c'est la **cathode** K, et l'électrode reliée à la couche avec la conductibilité électrique du type P – l'**anode** A (fig. 13.2, a et b).

Donc, cette structure P-N monocristalline à deux couches est placée dans un boîtier non démontable hermétique en métal-verre ou en céramique, qui la protège des influences extérieures (d'humidité, de la saleté, de la mécanique et de blessure).



**Figure 13.2** – Diode au silicium :

a – structure ; b – symbole ; c – caractéristiques courant-tension aux températures différentes ; d – conception

La partie inférieure du corps est accomplie en forme de l'écrou hexaèdre et s'achève par un axe fileté pour le vissage de la vanne dans un refroidisseur (fig. 13.2, d). Une telle structure du corps de la diode assure une bonne dérivation de la chaleur du passage P-N à l'environnement et sert de la borne extérieure de la cathode. Par la borne extérieure de l'anode est le fil souple de cuivre avec le bout, isolé du corps par un isolant.

Sur la figure 13.2 sont représentés les caractéristiques courant-tension d'une diode de silicium à courant nominal de 200 A. La branche directe contient deux parcelles caractéristiques : sur la première parcelle, coïncidant avec l'axe des abscisses, la diode a la résistance relativement grande et avec l'augmentation de la tension directe le courant augmente légèrement; sur la deuxième parcelle lors de l'augmentation de  $U_{dir.} > U_0$  la résistance de la diode est considérablement réduite, et le courant direct  $I_{dir.}$  augmente jusqu'à des valeurs définies par la résistance de charge.

Sur la branche inverse on distingue trois parcelles caractéristiques : la première parcelle OA (fig. 13.2, c) est relativement petite, le diode possède encore une faible conductibilité et par le passage s'écoule un petit courant  $I_{inv.}$ , mesuré en milliampères ; sur la deuxième parcelle AB à l'augmentation considérable de la tension inverse le courant  $I_{inv.}$  atteint de la saturation et augmente un peu ; la troisième parcelle BC est caractéristique par ce qu'aux significations définies de la tensions inverse le courant  $I_{inv.}$  augmente considérablement et a lieu une rupture du passage P-N. La valeur de la tension  $U_{persem.}$ , à qui la branche inverse se replie fortement, s'appelle la **tension de percement**.

Pour le bon fonctionnement de la vanne on prenne la tension inverse maximale acceptée (nominale)  $U_{inv.nom}$  à deux fois moins que la tension de percement  $U_{persem.}$ .

Les diodes de puissance au silicium sont disponibles sur les courants de 10 à 1000 A et des tensions inverses de 100 à 1500 V.

**Les diodes au germanium** en comparaison avec les diodes au silicium possèdent une plus petite chute de potentiel directe, ainsi que de plus petites significations des tensions admissibles inverses (de 500 à 600 V par rapport à 700–1500 V dans les diodes au silicium). Le courant inverse de ces diodes est dix fois plus que chez diodes au silicium.

**Les diodes au séléniques** admettent considérablement plus faibles densités du courant direct 50–60 mA/cm<sup>2</sup> et de plus faibles significations de la tension inverse de 40–50 V, que les diodes au germanium et au silicium, qui admettent les densités de courant direct de 40 à 80 A/cm<sup>2</sup> et les valeurs de la tension inverse de 400–1200 V.

Pour améliorer la valeur  $U_{inv.admissible}$  on utilise largement le couplage en série des éléments séléniques dans une colonne de redressement. En ce cas n'est pas nécessaire de l'application de diviseurs de tension (régulateurs de résistances), dont ont besoin des diodes au germanium et au silicium.

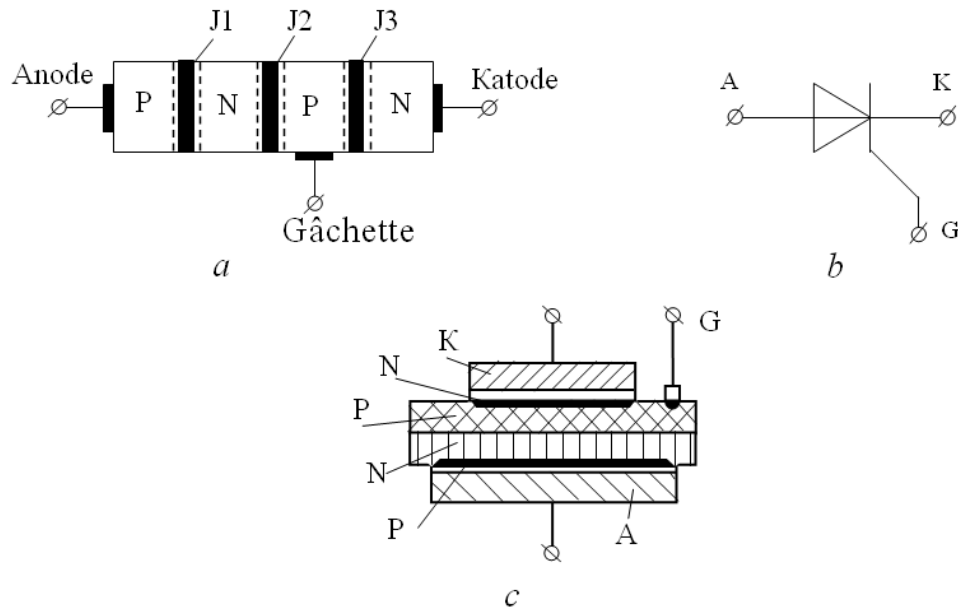
Un trait caractéristique des redresseurs séléniques est d'une grande capacité de surcharge (puisque'ils ont une l'inertie considérable thermique) en comparaison des redresseurs en germanium et en silicium, ainsi qu'une plus petite sensibilité aux surtensions de courte durée. Cela se passe parce qu'à la surtension accidentelle l'endroit de rupture se remplit par sélénium amorphe et l'élément sélénique restaure ses propriétés.

Les propriétés marquées des redresseurs séléniques sont la motivation pour leur application dans les redresseurs des basses tensions et des grands courants : installations de charge, installations galvaniques et électrolytiques etc.

Les caractéristiques courant-tension des diodes semi-conductrices dépendent de la température du passage P-N. À l'augmentation de la température pour tous les types des diodes ont lieu : la diminution de la chute de potentiel directe (voir fig. 13.2, b) aux mêmes courants directs; l'augmentation considérable du courant inverse accompagnée par une certaine augmentation de la tension de percement chez les diodes au silicium et au séléniques.



**13.1.3 Diodes commandés – thyristors.** L'élément principal des diodes commandés (un autre nom – thyristors) est un disque de silicium de conductibilité électronique, dans lequel par les méthodes spéciales technologiques est créé une structure semi-conductrice de quatre couches, dans lequel alternent des couches de différents types de conductivité (p-n-p-n). Finalement on a une structure monocristalline à trois jonctions P-N J1 – J2 – J3, inclus en série (fig. 13.3, *a*).

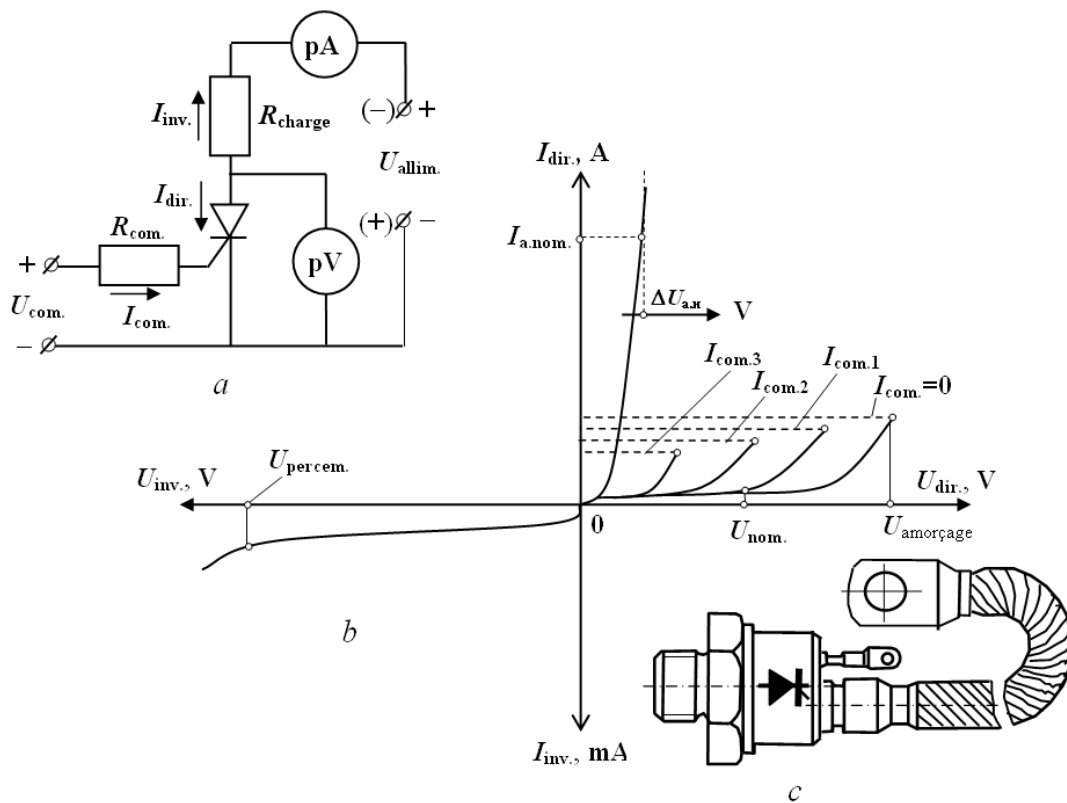


**Figure 13.3** – Thyristor au silicium : *a* – schéma de structure à quatre couches ; *b* – symbole ; *c* – dispositif de thyristor

La structure semi-conductrice du thyristor est montée dans un boîtier soit en métal-verre soit en céramique, dont la fondation a tige filetée et est la borne externe de l'anode. La cathode du thyristor est fait comme la borne flexible de cuivre avec un bout. L'électrode de commande (la gâchette) est placé à côté de la cathode (fig. 13.4, *c*) ou est placé dans un boîtier de cermet comprimés de forme ronde qui est scellée par la soudure froide.

Le boîtier comprimés du thyristor à l'aide de l'appareil de pression se connecte avec les refroidisseurs en alliage d'aluminium, en assurant les liaisons électriques et thermiques de la structure du boîtier et des refroidisseurs, qui ont une surface développée. Captage de courant de l'anode et de la cathode du thyristor est effectué directement à partir des refroidisseurs à l'aide des barres de cuivre, la borne de gate est situé sur le côté.

Pour un thyristor connecté dans un circuit électrique avec une source de courant continu réglable (fig. 13.4, *a*), dont la polarité on peut modifier, la relation entre le courant passant à travers le thyristor en sens direct et inverse et la tension entre l'anode et la cathode reflète une caractéristique statique courant-tension (fig. 13.4, *b*). Si le circuit de gâchette du thyristor n'est pas connecté à une source de commande  $U_{com.}$ , et la tension entre l'anode et la cathode ne dépasse pas la valeur de la tension d'amorçage  $U_{amor.}$ , indépendamment de la polarité de la tension appliquée  $U_{allim.}$  entre l'anode et la cathode le courant pratiquement ne passe pas.



**Figure 13.4** – Thyristor : *a* – schéma de l'essai pour obtenir les caractéristiques ; *b* – caractéristique statique courant-tension ; *c* – vue générale du thyristor sans radiateur

En effet, si à l'anode du thyristor est appliqué le potentiel négatif, et à la cathode – positif, alors à la jonction moyenne J2 (fig. 13.3, *a*) sera appliquée la tension directe et aux jonctions J1 et J3, connectés successivement, la tension inverse  $U_{inv.}$ . Thyristor s'avère être enfermé. Dans lui et dans la chaîne extérieure passe un courant inverse très faible  $I_{inv.}$ , ce qui correspond à la branche inverse de la caractéristique courant-tension du thyristor, qui est semblable à la branche  $I_{inv.} = f(U_{inv.})$  de la diode de puissance de silicium (voir la figure 13.2, *c*). Si à l'anode et à la cathode du thyristor appliquer les potentiels de l'autre polarité, alors à la jonction J2 sera appliquée la tension inverse que définit à nouveau l'état fermé du thyristor.

Le passage du thyristor de l'état fermé à l'état ouvert peut être réalisée par deux moyens :

1. En appliquant à l'anode du thyristor une tension directe supérieure à la tension d'amorçage  $U_{amorçage}$  (fig. 13.4, *b*), ce qui diminue considérablement sa résistance (thyristor s'ouvre) et le courant augmente, dont la valeur est limitée par la résistance du circuit externe. Toutefois, cette ouverture par l'anode (par tension) pour la commande des thyristors généralement n'est pas autorisée.

2. Par application à la gâchette d'une impulsion de tension positive  $U_{com.}$  à la tension directe sur l'anode du thyristor. Sous l'action de la  $U_{com.}$  dans la jonction J3 aura lieu un faible courant  $I_{com.}$  neutralisant l'action de la jonction fermée J2, et le thyristor s'ouvre à une plus petite signification  $U_{amorçage}$ . En direction de l'anode vers la cathode du thyristor passera le courant direct  $I_{dir.}$ , dont la valeur est pratiquement limitée par la seule résistance d'un circuit externe  $R_{charge}$ , de sorte que la chute de

tension au thyristor est très faible et ne dépasse pas 0,5–1,2 V (fig. 13.4 – la branche directe).

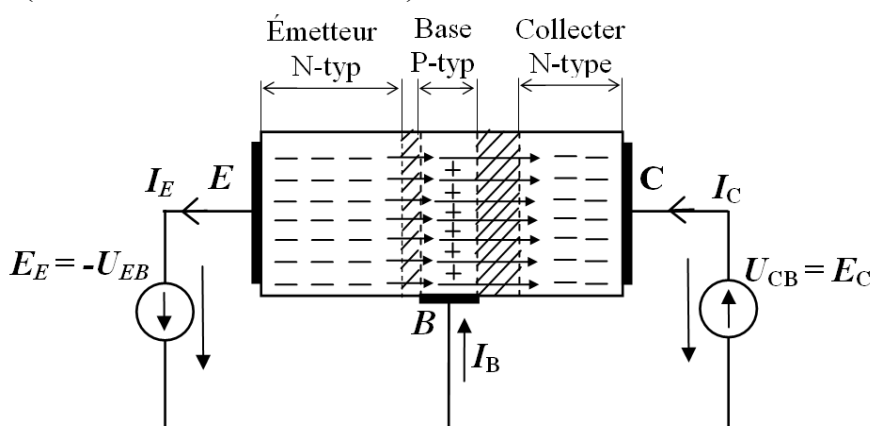
Un tel processus d'amorçage du thyristor est très rapide (pas plus de 15–20  $\mu$ s). Avec la croissance de  $I_{com}$ , diminue la tension d'amorçage  $U_{amorçage}$  thyristor et à l'état ouvert de l'appareil correspond la caractéristique courant-tension d'une diode non commandé. Si changer la polarité de la tension appliquée entre l'anode et la cathode du thyristor, alors la jonction J2, précédemment ouverte, en 25–250  $\mu$ s (en fonction de la puissance du thyristor) récupère ses propriétés fermant et le thyristor est prêt de nouveau au travail.

En cas d'alimentation du thyristor de la source de courant continu on peut restaurer ses propriétés de blocage seulement par voie de la rupture de la chaîne anodique ou à l'aide de dispositifs spéciaux créer sur l'anode la tension négative de courte durée. En cas d'alimentation d'une source de la tension alternative le thyristor se ferme pendant la demi-onde négative de la tension.

**13.1.4 Triodes à semi-conducteurs – transistors** sont des appareils électroniques fondés sur les propriétés de deux, disposés très près l'un de l'autre des jonctions électrons-trous P-N. La présence de trois couches avec une différente conductibilité détermine aux frontières de leur section deux jonction P-N, caractérisés par un équilibre dynamique.

Les transistors sont divisés en deux groupes – bipolaires et unipolaires. Bipolaires ce sont les transistors, dont le courant est conditionné par les porteurs de deux types (électrons et trous). Dans les transistors unipolaires (on les appelle transistors à effet de champ) le courant est conditionné par les porteurs d'un seul signe (ou électrons ou trous). Structure et principe de fonctionnement du transistor nous examinerons à l'exemple des transistors bipolaires.

Le transistor bipolaire représente une structure de trois couches du type P-N-P (fig. 13.5) ou du type N-P-N. Sur la figure 13.6, *a* et *b* sont montrés les symboles de ces transistors. Le transistor s'appelle bipolaire parce que les processus physiques en lui sont liés au mouvement des porteurs des charges des deux signes (des trous et des électrons).

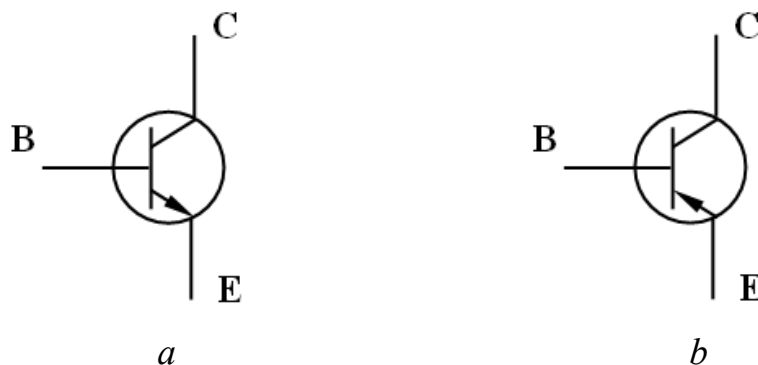


**Figure 13.5** – Transistor bipolaire du type N-P-N

La couche intermédiaire du transistor bipolaire s'appellerait la base B, la couche extrême – le collecteur C, et d'autre couche extrême – l'émetteur E

(voire la figure 13.6). Chaque couche a une borne, à l'aide de laquelle le transistor est inclus dans la chaîne.

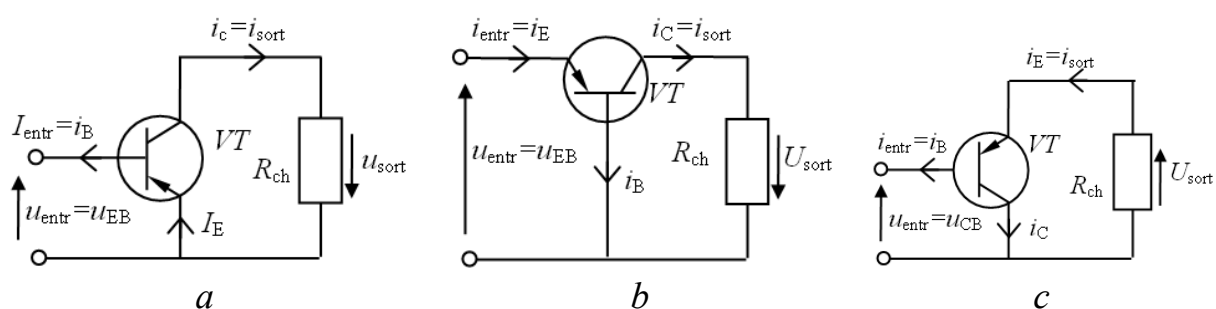
Trois variantes du schéma de couplage du transistor (fig. 13.7) sont possibles : avec l'émetteur commun (EC), avec la base commune (BC) et avec le collecteur commun (CC).



**Figure 13.6** – Symboles des transistors : *a* – de type N-P-N ; *b* – de type P-N-P

Quel que soit le schéma de couplage, les transistors peuvent fonctionner dans un des quatre modes, qui sont différents dans la polarité de la tension sur les jonctions émetteur-base et collecteur-base.

1. Le mode normal actif, dont la jonction émetteur-base est connectée en sens directe et la jonction collecteur-base en sens l'inverse.
2. Le mode inverse actif, dont la jonction émetteur-base est connectée en sens inverse et la jonction collecteur-base en sens directe.
3. Le mode de coupure, dont les deux jonctions sont connectées en sens inverse.
4. Le mode de saturation, dont les deux jonctions sont connectées en sens direct.



**Figure 13.7** – Schémas de couplage des transistors :  
*a* – à émetteur commun ; *b* – à base commune ; *c* – à collecteur commun

Les modes de saturation et de coupure sont utilisés dans les appareillages numérique et d'impulsion.

Le principal fonctionnement du transistor dans les schémas, à qui il est appliquée pour amplifier les signaux, est son mode actif. Lorsque vous vous connectez le pôle positif de la f.é.m. constante  $E_E = -U_{EB}$  à la base la barrière de potentiel de la jonction P-N (transistor N-P-N sur la figure 13.5) entre la base et l'émetteur baisse. Les électrons libres se diffusent (s'injectent) de l'émetteur dans la base, formant un courant  $I_E$  dans le circuit de l'émetteur. Si, entre le collecteur et la base est inséré

une source de la f.é.m. continu  $E_C = U_{CB}$  avec le pôle négatif à la base, alors la barrière de potentiel de la jonction P-N entre la base et le collecteur augmente. Une grande partie des électrons, injectés de l'émetteur à la base, est impliquée par un fort champ électrique avec la tension  $E_{CB}$  de cette jonction P-N, formant un courant  $I_C$  dans le circuit de collecteur. Notant que le champ électrique dans la jonction collecteur-base existe même si la branche avec la source de la f.é.m.  $E_C$  est ouverte. Par conséquent, le courant de collecteur peu dépend de la signification de la tension  $U_{CB} > 0$ . La partie insignifiante des électrons libres, injectés de l'émetteur à la base, forme un courant  $I_B$  dans le circuit de base.

La relation entre les courants de circuit de collecteur et de l'émetteur du transistor est caractérisée par le coefficient de transfert de courant

$$\alpha = i_C/i_E. \quad (13.1)$$

Le nombre des porteurs de charge de l'émetteur, provenant de la recombinaison dans la base, détermine le courant de base:  $i_B = i_E - i_K$ . Lors de l'examen des propriétés d'amplification des transistors pour les signaux variables les schémas de leur couplage on considère sans sources d'alimentation, puisque par rapport à d'autres les résistances internes des sources d'alimentation sont très faibles. Le plus souvent on utilise le schéma à EC (voir le tableau 13.1), qui permet de renforcer le courant, la tension et la puissance. Pour ce circuit, les gains d'amplification en courant, tension et puissance sont déterminés à partir des expressions :

$$k_i = \frac{i_{\text{sort}}}{i_{\text{entr}}} = \frac{i_C}{i_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta > 1; \quad (13.2)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{sort}}}{u_{\text{entr}}} = \frac{i_C \cdot R_{ch}}{i_B \cdot R_{entr}} = \alpha \frac{R_{ch}}{R_{EB}} > 1; \quad (13.3)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \cdot \frac{R_{ch}}{R_{EB}} > 1; \quad (13.4)$$

où  $R_{EB}$  – la résistance de la jonction émetteur-base.

Nous avons le gain d'amplification en courant

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} > 1, \quad (13.5)$$

et, de plus, la tension de sortie  $u_{\text{sort}}$  se trouve en opposition de phase avec la tension d'entrée  $u_{\text{entr}}$ .

Pour le montage à BC les gains d'amplification en courant, tension et puissance sont déterminés à partir des expressions :

$$k_i = \frac{i_{\text{sort}}}{i_{\text{entr}}} = \frac{i_C}{i_B} = \alpha < 1; \quad (13.6)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{sort}}}{u_{\text{entr}}} = \frac{i_C \cdot R_{ch}}{i_B \cdot R_{entr}} = \alpha \frac{R_{ch}}{R_{EB}} > 1; \quad (13.7)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \alpha^2 \cdot \frac{R_{ch}}{R_{EB}} > 1. \quad (13.8)$$

Le montage à BC s'applique généralement à des fréquences plus élevées, mais ce schéma est caractérisé par le coefficient d'amplification en courant  $k_i < 1$ . De plus la tension de sortie  $u_{\text{sort}}$  se trouve en phase avec la tension d'entrée  $u_{\text{entr}}$ .

Pour le montage à CC les gains d'amplification en courant, tension et puissance sont déterminés à partir des expressions :

$$k_i = \frac{i_{\text{éblx}}}{i_{\text{éx}}} = \frac{i_{\text{é}}}{i_{\text{o}}} = \frac{i_{\text{é}} + i_{\text{o}}}{i_{\text{o}}} = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha} > 1 ; \quad (13.9)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{éblx}}}{u_{\text{éx}}} = \frac{u_{\text{éblx}}}{u_{\text{éblx}} + u_{\text{o}}} = \frac{i_{\text{é}} \cdot R_{\text{H}}}{i_{\text{é}} (R_{\text{H}} + R_{\text{o}})} = \frac{R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + R_{\text{o}}} \leq 1 ; \quad (13.10)$$

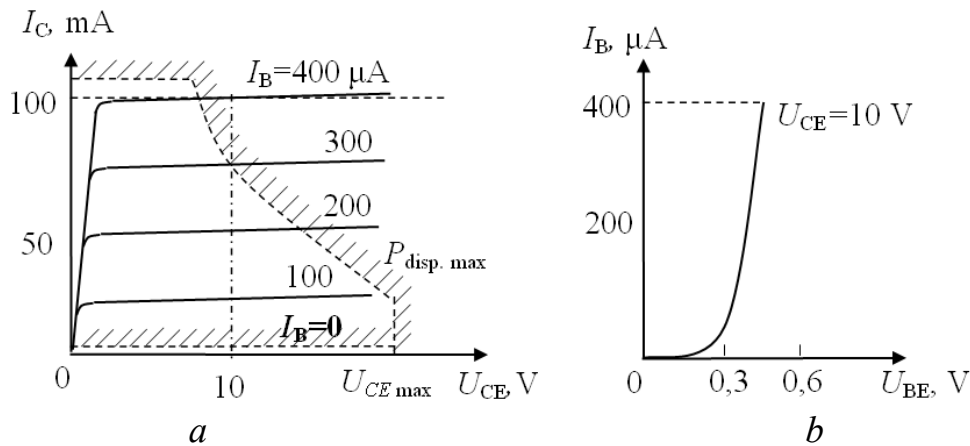
$$k_p = k_i \cdot k_u \cong k_i = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha} > 1 . \quad (13.11)$$

La tension de sortie  $u_{\text{sort}}$  pour le montage à CC se trouve en phase avec la tension d'entrée  $u_{\text{entr}}$ .

En examinant les montages principaux d'amplificateurs, on se base sur ce que le travail du transistor se passe sur les zones linéaires de ses caractéristiques que correspond aux faibles signaux d'entrée, et lors du calcul des gains d'amplification des amplificateurs dont les composants sont seulement les transistors et les résistances, en prenant en considération les conditions du travail sur de moyennes fréquences, on néglige par l'influence des capacités d'entrée, de transition et de sortie.

Les caractéristiques principales des transistors sont les **caractéristiques statiques d'entrée et de sortie**, dont la nature dépend du schéma de couplage du transistor.

Nous examinerons à titre d'exemple ces caractéristiques pour le schéma à EC (fig. 13.8).



**Figure 13.8** – Caractéristiques statiques du transistor dans le schéma à EC :  
a – de sortie ; b – d'entrée

La caractéristique d'entrée du transistor est considérée comme la dépendance du courant d'entrée de la tension d'entrée à la tension de sortie constante. Pour le schéma à EC c'est la dépendance  $I_B(U_B)$  lors de  $U_C = \text{const}$ .

La caractéristique de sortie du transistor est considérée comme la dépendance du courant de sortie de la tension de sortie au courant d'entrée constant. Pour le schéma à EC c'est la dépendance  $I_C(U_C)$  lors de  $I_B = \text{const}$ .

Caractéristiques statiques du transistor bipolaire sont présentés dans la figure 13.8. La zone de modes de fonctionnement d'un transistor sur ses

caractéristiques est limitée au maximum par les valeurs valides pour le courant  $I_{C\max}$ , la tension  $U_{CE\max}$  et de la puissance de la dispersion  $P_{\text{disp.max}} \approx U_{CE} \cdot I_C$ , ainsi que par les distorsions non-linéaires à des petites valeurs de courant de collecteur.

La dignité principale des transistors bipolaires – une haute vitesse à d'assez grands courants du collecteur. La présence des dissipateurs thermiques extérieurs permet de travailler aux transistors bipolaires à la puissance de la dispersion jusqu'à 50 W et les courants jusqu'à 10 A. Leur principal inconvénient est assez petite résistance de la chaîne d'entrée en montages à EC (1–10 kΩ).

### 13.2 Redresseurs à semi-conducteurs

Redresseur c'est une installation destinée à la transformation du courant alternatif en courant continu. Dans la pratique, on utilise beaucoup de schémas des redresseurs comme monophasé et triphasé. Le choix de l'une ou l'autre schéma est déterminée par les propriétés appliquées par les diodes et les conditions de travail du redresseur. Par exemple, dans les appareillages de redresseur-chargeur, où l'on a besoin de petites valeurs de la tension redressée, les plus acceptables sont les schémas des redresseurs monophasé à diodes au sélénium. Au redressement de la haute tension jusqu'à 1000–1500 V on s'adresse souvent au couplage en série des diodes ou utilise des diodes sur les grandes valeurs  $U_{\text{inv}}$ .

Examinons le fonctionnement des principaux schémas de redressement monophasé et triphasé, en supposant pour des raisons de simplicité de calcul et de faciliter la compréhension de la physique des processus dans les éléments de schémas, que le redresseur travaille sur la charge active et comprend les diodes idéales et un transformateur, ce qui permet de négliger les chutes de tension, ainsi que les courants inverses des diodes, les inductances et les courant de magnétisation du transformateur. Les principaux éléments du redresseur (fig. 13.9) sont généralement : un transformateur de puissance 1, employé pour la coordination de la tension d'entrée  $U_{\text{entr}}$  et la tension sortie  $U_{\text{sort}}$  du redresseur, ainsi que pour la séparation électrique du réseau d'alimentation et la chaîne de charge; l'unité des éléments de redressement 2, réalisant le redressement de courant alternatif; un filtre de lissage 3, employé pour la réduction de la pulsation du courant redressé dans le circuit de charge 4. Si le redresseur est commandé, alors le schéma-bloc contient encore un bloc 6, qui contient un système de gestion de bloc-redresseur (thyristors). Pour la protection du redresseur contre les dommages lors des régimes d'avarie dans son schéma on introduise l'unité de protection et d'alarme 5.

Dans certains cas, dans le schéma d'un redresseur il peut manquer certains éléments, par exemple, le filtre 3, lors de fonctionnement d'un redresseur sur la charge inductive, ou le transformateur de puissance 1 en cas de connexion du redresseur par schéma sans transformateur.

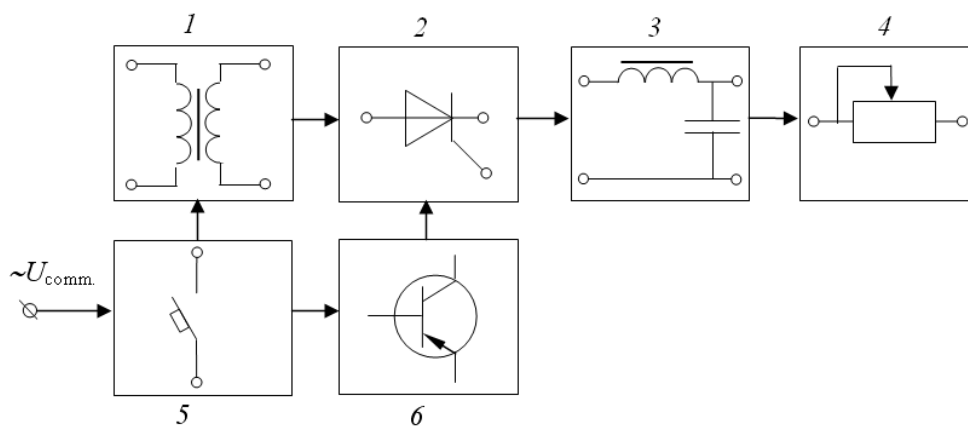


Figure 13.9 – Schema-bloc du redresseur

**13.2.1 Redresseur du courant monophasé.** Nous examinerons le schéma du *redresseur simple alternance monophasé* (fig. 13.10). Dans ce schéma le transformateur a un bobinage secondaire, dont la tension  $u_2$  change d'après la loi sinusoïdale  $u_2 = U_{\max 2} \cdot \sin \omega t$ . Le courant dans la chaîne de charge  $R_d$  passe seulement aux demi-cycles (demi-onde) positifs (fig. 13.10, *b*), quand le point *a* du bobinage secondaire, à qui on adjoint l'anode de la diode VD, aurait le potentiel positif par rapport au point *b*. Aux demi-cycles négatifs (l'intervalle du temps  $t_1 - t_2$ ) à la diode VD est appliquée la tension inverse, et il sera fermé.

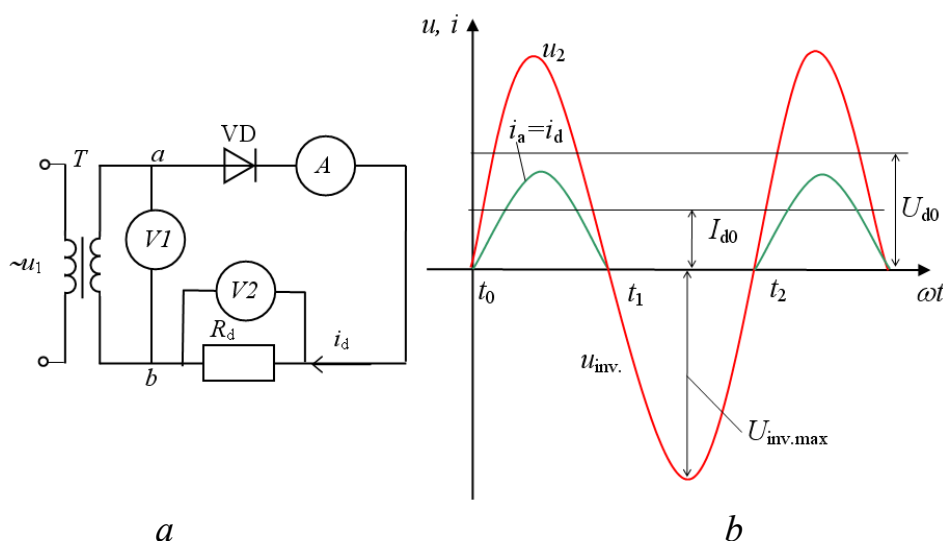


Figure 13.10 – Redresseur simple alternance monophasé :  
*a* – schema ; *b* – diagrammes temporels de courant et des tensions

La tension redressée  $u_d$  peut être décrite par les demi-ondes positives de la tension  $u_2$  du bobinage secondaire du transformateur. La tension moyenne pour la période aux bornes de la charge est appelée la **tension redressée**  $U_d$ . Le courant dans la charge  $R_d$  se déroule dans un sens, mais a un caractère pulsatile et représente le courant redressé  $i_d$ .

La tension redressée  $u_d$  et le courant  $i_d$  contiennent les composantes constantes  $U_d$  et  $I_d$  et les composantes variables (les pulsations)  $U_{d\sim}$  et  $I_{d\sim}$ . La qualité de fonctionnement du redresseur est estimée par les rapports entre la composante constante et les pulsations de la tension et du courant.



Pour le schéma du redresseur simple alternance monophasé les rapports entre les tensions, les courants et les puissances des parties du redresseur sont suivantes.

La valeur moyenne de la tension redressée

$$U_{d0} = 0,45 \cdot U_2. \quad (13.12)$$

La valeur maximale de la tension inverse, mise à la diode dans la partie non-conductrice de la période :

$$U_{inv.max} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 3,14 \cdot U_{d0}, \quad (13.13)$$

où  $U_2$  – la valeur efficace de la tension de l'enroulement secondaire du transformateur  $T$ .

La valeur moyenne du courant traversant la diode et la charge

$$I_a = I_d = U_{d0}/R_d. \quad (13.14)$$

La puissance moyenne rendue à la charge est déterminée par la multiplication de la tension  $U_d$  et du courant  $I_d$ , i.e.  $P_d = U_d \cdot I_d$ .

La puissance calculée du transformateur, qui détermine ses dimensions, de 3,09 fois plus de puissance dans la charge  $R_d$

$$S_{Tp} = 3,09 U_d \cdot I_d. \quad (13.15)$$

Ainsi, la puissance calculée du transformateur travaillant sur redresseur simple alternance monophasé est plus grande que la puissance dans la charge, puisque dans son bobinage secondaire passe le courant non sinusoïdal, ayant les composantes constante et variable, et dans l'enroulement primaire, à l'exception du courant principal de la fréquence  $f_1$  déroulent les courants des harmoniques supérieures. Par rapport au réseau de l'alimentation ces courants sont réactifs et ils ne créent pas de la puissance utile et seulement chauffent les bobinages du transformateur.

La valeur efficace du courant de l'enroulement secondaire du transformateur est déterminé par la relation

$$I_2 = 1,57 \cdot I_d. \quad (13.16)$$

L'équation (13.16) nous donne que l'indication de l'ampèremètre  $A$  du système électromagnétique, inclus dans la chaîne du bobinage secondaire du transformateur  $T$  (fig. 13.9,  $a$ ), à 1,57 fois excède l'indication de l'ampèremètre magnéto-électrique, puisque la première mesure la valeur efficace du courant, et le second – la valeur moyenne du courant dans le circuit de charge.

La valeur efficace de la tension du bobinage secondaire

$$U_2 = 2,22 \cdot U_d. \quad (13.17)$$

La valeur efficace du courant du bobinage primaire, en tenant compte du rapport de transformation  $m = w_1/w_2$

$$I_1 = 1,51 \frac{1}{m} I_d. \quad (13.18)$$

Le schéma examiné du redresseur simple alternance monophasé présente les inconvénients suivants : la mauvaise utilisation du transformateur,

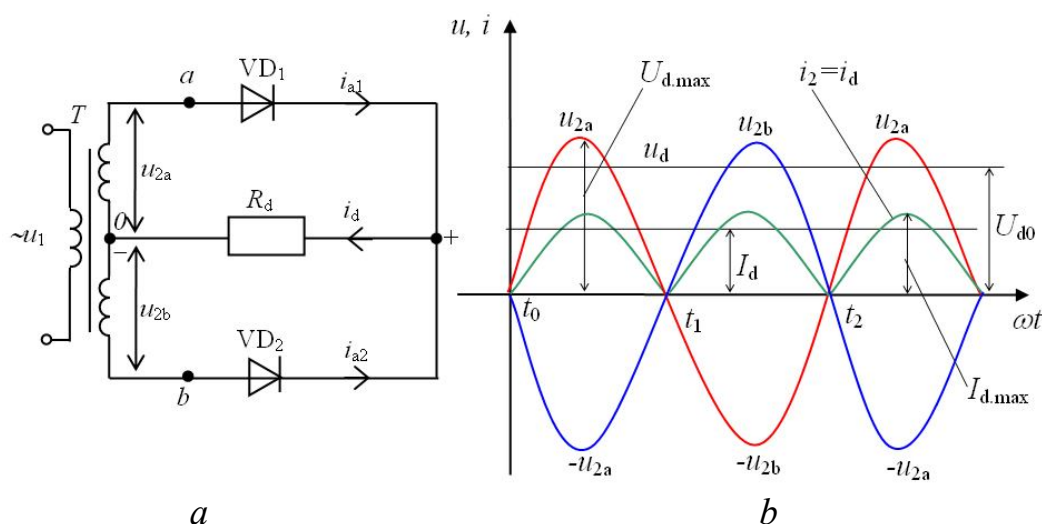
une grande tension inverse sur les diodes, un grand facteur d'ondulation de la tension redressée.

Les dignités du schéma donné : sa simplicité (on applique seulement une diode), la simplicité du transformateur d'alimentation (l'absence du point nul sur le bobinage secondaire, comme dans le schéma *double alternance*).

**Redresseur double alternance monophasé** se compose d'un transformateur ayant un bobinages primaire et connectés en série deux bobinages secondaires, qui ont une borne du point commun (neutre) (fig. 13.11, *a*). Le rapport de transformation  $m$  est défini par la relation  $U_1/U_2$ , où  $U_2$  – la tension d'un bobinage secondaire (la tension de phase).

Les extrémités libres des enroulements secondaires  $a$  et  $b$  sont connectées aux anodes des diodes  $VD_1$  et  $VD_2$ , dont les cathodes sont reliées ensemble. La charge  $R_d$  est connectée entre les cathodes des diodes (pôle positif du redresseur), et la borne nulle du transformateur (le pôle négatif du redresseur).

Dans ce schéma les diodes, comme les bobinages secondaires du transformateur, travaillent en alternance : en passant le courant aux significations positives de la tension d'anode  $u_{2a}$  et  $u_{2b}$  (fig. 13.11, *b*).



**Figure 13.11** – Redresseur double alternance monophasé :  
*a* – schéma ; *b* – diagrammes temporels des courant et des tensions

En effet, lors du changement de la tension aux points  $a$  et  $b$  d'après la loi  $u_2 = U_{2\max} \cdot \sin \omega t$  à cette demi-phase, quand la tension de l'enroulement  $0-a$  est positive, le courant passe par diode  $VD_1$ , dont l'anode est positif par rapport à la cathode, liée par une résistance  $R_d$  au point  $0$  d'enroulements secondaires. L'anode de la diode  $VD_2$ , ainsi que la borne  $b$  de l'enroulement  $0-b$ , à cette demi-phase ( $t_0 - t_1$ ) est négatif par rapport au zéro de la borne  $0$  et, par conséquent, la diode  $VD_2$  est bloquée et le courant ne passe pas.

Au demi-phase suivante (l'intervalle de temps  $t_1 - t_2$  sur la figure 13.11, *b*), quand les tensions sur les bobinages primaires et secondaires du transformateur changent sa polarité sur inverse, le courant va passer par diode  $VD_2$ , et la diode  $VD_1$  s'avère être enfermée par la tension négative. Le courant dans la charge  $R_d$

de tous les temps s'écoule dans un sens – de cathodes des diodes au point zéro 0 des enroulements secondaires du transformateur.

Pour ce schéma sont justes les rapports suivants entre les tensions, les courants et les puissances des parties du redresseur.

La valeur moyenne de la tension redressée en cas de diodes et transformateur parfaites

$$U_{d0} = 0,9 \cdot U_2 . \quad (13.19)$$

Diode, qui ne fonctionne pas dans la partie négative de la période, est sous l'influence d'une tension inverse, égale au double de la tension de phase, de sorte que le potentiel positif de sortie  $a$  ( $b$ ) de l'enroulement secondaire du transformateur par l'intermédiaire de la diode passante  $VD_1$  ( $VD_2$ ) est appliquée à la cathode de la diode  $VD_2$  ( $VD_1$ ) et l'anode de la diode fermée a le potentiel négatif.

La valeur maximale de la tension inverse est égale :

$$U_{inv.max} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = 3,12 \cdot U_{d0} . \quad (13.20)$$

La valeur moyenne du courant redressé dans la charge

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_2}{1,11 \cdot R_d} . \quad (13.21)$$

La valeur moyenne du courant dans chaque diode est à 2 fois moins que le courant  $I_d$ , passant par la charge, i.e.  $I_a = 0,5 \cdot I_d$ .

La valeur efficace du courant de la diode  $I_{a,eff}$  est égale à la valeur efficace du courant de l'enroulement secondaire du transformateur  $I_2$  et est définie par un rapport

$$I_2 = 0,785 \cdot I_d = 1,57 \cdot I_a . \quad (13.22)$$

La valeur efficace de la tension de l'enroulement secondaire

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{d0} . \quad (13.23)$$

La valeur efficace du courant de l'enroulement primaire en tenant compte du rapport de transformation  $m$  est égal :

$$I_1 = \sqrt{2} \frac{1}{m} I_2 = 1,11 \frac{1}{m} I_d . \quad (13.24)$$

Les puissances calculées des enroulements du transformateur sont définies par la multiplication des valeurs efficaces du courant et de la tension :

$$S_2 = 2 \cdot I_2 \cdot U_2 = 2 \cdot 0,785 \cdot I_d \cdot 1,11 \cdot U_{d0} = 1,74 \cdot P_d ; \quad (13.25)$$

$$S_1 = I_1 \cdot U_1 = 1,11 \frac{1}{m} I_d \cdot 1,11 \cdot m \cdot U_{d0} = 1,23 \cdot P_d . \quad (13.26)$$

La puissance calculée du transformateur :

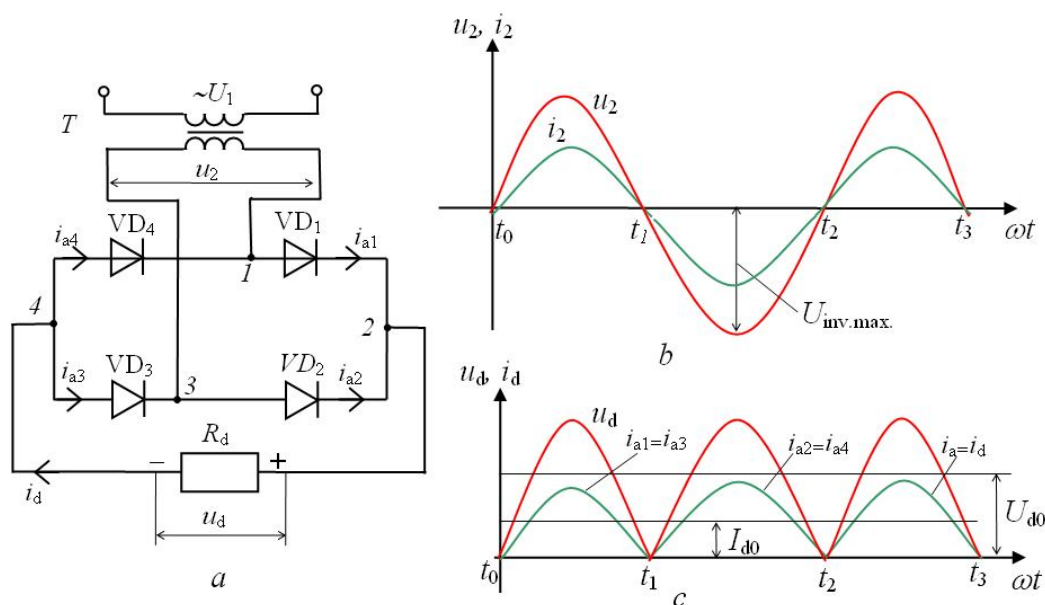
$$S_{tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{1,23 + 1,74}{2} P_d = 1,48 \cdot P_d . \quad (13.27)$$

La fréquence de l'harmonica principal de la composante variable de la tension redressée en schéma donné est égale à la fréquence double du réseau  $2f_1$ . Le facteur d'ondulation de la tension en sortie du redresseur est égal :

$$q = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67, \quad (13.28)$$

où  $m$  – nombre des phases du redresseur, i.e. le nombre des demi-ondes de la tension redressée par une période du courant alternatif alimentant le redresseur.

**Le schéma en pont monophasé (pont de Graetz)** est constitué d'un transformateur  $T$  avec deux bobinages et de quatre diodes  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$  et  $VD_4$ , montées en pont (fig. 13.12, *a*). Une diagonale du pont (les points 1, 3) se joint au bobinage secondaire, l'autre (les points 2, 4) – à la charge  $R_d$ . Le point commun des cathodes des diodes  $VD_1$  et  $VD_2$  (le point 2) est le pôle positif du redresseur, et le pôle négatif – le point commun des anodes des diodes  $VD_3$  et  $VD_4$  (le point 4).



**Figure 13.12** – Redresseur en pont monophasé :  
*a* – schéma ; *b* et *c* – diagrammes temporels des tensions et des courants

Les diodes dans ce montage travaillent alternativement par deux. Lors du demi-cycle positif de la tension  $u_2$  les diodes  $VD_1$  et  $VD_3$  sont passantes, et aux diodes  $VD_2$  et  $VD_4$  est appliquée la tension inverse et qu'ils sont fermés. Pendant le demi-cycle négative de la tension  $u_2$  les diodes  $VD_2$  et  $VD_4$  seront passantes, et les diodes  $VD_1$  et  $VD_3$  seront sous la tension inverse.

Le courant  $i_d$  dans la charge circule tout le temps dans un sens – des cathodes des diodes  $VD_1$  et  $VD_2$  vers les anodes des diodes  $VD_3$  et  $VD_4$ . Le courant  $i_2$  dans le bobinage secondaire du transformateur (fig. 13.12, *b*) change sa direction toutes les demi-cycle et sera sinusoïdal. La composante constante du courant dans le bobinage secondaire est absente. Donc, il n'y pas de sous-aimantation du noyau du transformateur par le flux de force magnétique constant. Le courant dans le bobinage primaire du transformateur est aussi sinusoïdal.

Les valeurs moyennes de la tension  $U_{d0}$  et du courant  $I_a$  à travers une vanne dans ce montage sont les mêmes que dans le montage avec le point nul.

La tension inverse appliquée aux diodes fermées, est défini par la tension  $u_2$  du bobinage secondaire du transformateur (fig. 13.12, *b*), de sorte que les diodes ne travaillant pas au demi-cycle donné se trouvent adjointes vers le bobinage secondaire du transformateur à travers deux autres diodes travaillant, la chute de tension dans lesquelles on peut négliger, i.e.

$$U_{\text{inv.max}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,57 \cdot U_{d0} \quad (13.29)$$

Les rapports entre d'autres valeurs pour le couplage en pont monophasé sont amenés dans le tableau 13.1.

Tableau 13.1 – Rapports entre les courants et les tensions aux redresseurs

Schéma du redresseur	Dépendance $U_d$ de l'angle du réglage en régime continu	$U_{d0}/U_{2\text{simple}}$	$U_{\text{inv.max}}/U_{d0}$	$I_a/I_d$	$I_{a.\text{efficace}}/I_d$	$I_2/I_d$	$S_{tr}/P_d$	facteur d'ondulation, %
à double alternance monophasé	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	0,9	3,14	0,5	0,785	0,785	1,48	67
					0,71	0,71	1,34	
en pont monophasé	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	0,9	1,57	0,5	0,785	1,11	1,23	67
					0,71	1,0	1,11	
à simple alternance triphasé	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	1,17	2,09	0,33	0,585	0,585	1,37	25
					0,577	0,577	1,35	
en pont triphasé	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	2,34	1,05	0,33	0,577	0,817	1,05	6

*Remarques :*

1. Pour les redresseurs non commandés  $\alpha = 0$ ,  $\cos\alpha = 1$  et  $U_d = U_{d0}$ .
2. Pour tous les schémas il convient  $U_2$  – la tension de phase et  $X_2 = 0$ .
3. Les rapports pour  $I_{a.\text{efficace}}$ ,  $I_2$ ,  $S_{tr}$  sont indiqués à  $L_d = 0$  (le numérateur) et  $L_d = \infty$  (le dénominateur).

Nous comparerons les schémas du redressement monophasé.

**Le schéma à double alternance monophasé :**

1. Le nombre des diodes à 2 fois moins que dans le schéma en pont monophasé.
2. Les pertes de la puissance dans le redresseur seront moins, puisque dans le schéma à double alternance monophasé le courant passe dans une diode, et dans le schéma en pont – il passe successivement dans deux diodes.

**Le schéma en pont monophasé :**

1. La tension inverse sur les diodes à 2 fois moins que dans le schéma à double alternance.
2. La tension (nombre de spires) à 2 fois moins pour une même valeur de  $U_{d0}$ .
3. Le transformateur a l'exécution ordinaire puisqu'il n'y a pas de borne du point moyen sur le bobinage secondaire
4. La puissance calculée du transformateur sur 25 % moins que dans le schéma à double alternance, donc, on dépense moins du cuivre et de fer, les dimensions et la masse seront moins.

Ce schéma d'un redresseur peut fonctionner sans transformateur, si la tension du réseau  $u_1$  est suffisante par la valeur pour obtenir la signification nécessaire  $U_{d0}$  et il n'a pas de nécessité dans isolation de la chaîne du courant redressé du réseau d'alimentation.

**13.2.2 Redresseurs à courant triphasé.** Par analogie avec les schémas de courant monophasé pour le redressement de courant triphasé, on s'applique le schéma triphasé à simple alternance et le schéma en pont.

**Schéma triphasé à simple alternance** (à point neutre) est montrée sur la figure 13.13. On connecte au réseau du courant triphasé un transformateur T, dont trois bobinages primaires peuvent être relier à l'étoile ou au triangle, les bobinages secondaires – seulement à l'étoile. Les bornes libres  $a$ ,  $b$  et  $c$  de chacune des phases du bobinage secondaire se joignent aux anodes des vannes  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$ . Les cathodes des vannes se lient ensemble et servent le pôle positif pour le circuit de charge  $R_d$  et le point nul  $0$  des bobinages secondaires du transformateur – le pôle négatif.

À partir du diagramme (fig. 13.13,  $b$ ) on voit que les tensions  $u_{2a}$ ,  $u_{2b}$  et  $u_{2c}$  sont décalés en phase de  $2\pi/3$  (radians) et pour  $1/3$  de la période la tension d'une phase est au-dessus des deux autres phases par rapport au point nul du transformateur. Le courant à travers la vanne  $i_a$  et la bobine secondaire associé et à travers la charge passera pendant ce tiers de période, lorsque la tension de cette phase est plus que des deux autres. La vanne travaillant cesse de passer le courant quand le potentiel de son l'anode devient en dessous du potentiel globale de cathodes.

Le passage du courant de l'un diode à l'autre (la commutation de courant) se produit au moment de l'intersection des courbes des tensions de phase (les points  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  de la figure 13.13,  $b$ ). Le courant redressé  $i_d$  passe dans la charge  $R_d$  sans arrêt (fig 13.13,  $c$ ).

La tension de sortie du redresseur  $u_d$  à n'importe quel moment est égal à la signification instantanée de la tension de l'enroulement secondaire de tel bobinage secondaire, dans lequel la vanne est ouverte. La tension redressée représente l'enveloppe des l'ondes sinusoïdale des tensions des phases  $u_{2\text{simple}}$ .

Au changement de la tension secondaire d'après la loi  $u_{2\text{simple}} = U_{2\text{max}} \cdot \sin \omega t$  le courant de chacun des phases sera une fonction sinusoïdale

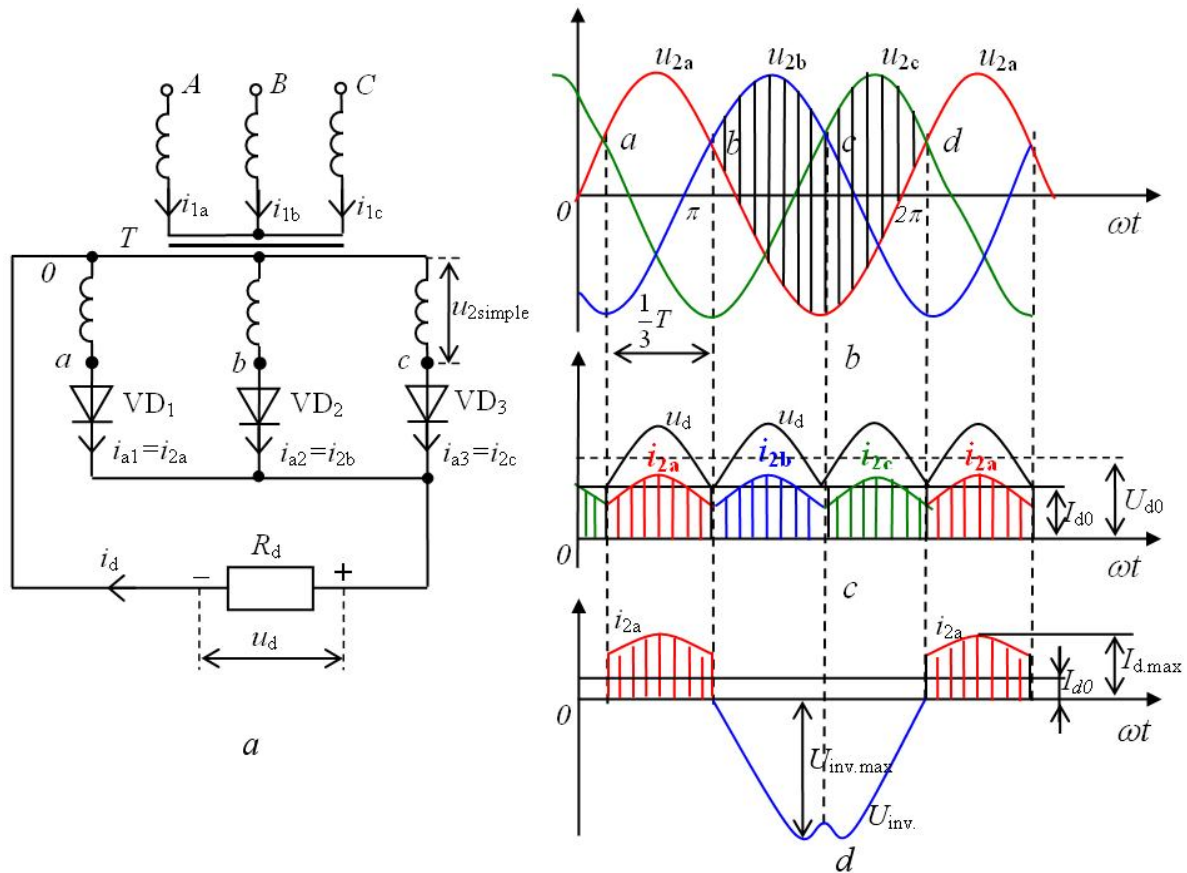
$$i_2 = \frac{u_2}{R_d} = \frac{U_{2\text{max}}}{R} \sin \omega t. \quad (13.30)$$

Donc, le courant anodique  $i_a$  aura la forme d'un rectangle avec la base de  $2\pi/3$ , limité par-dessus par le segment de la sinusoïde. La figure 13.13,  $g$  représente le courant de la phase  $a$ , les courants des phases  $b$  et  $c$  sont représentés par des courbes semblables, accolés à  $2\pi/3$  une par rapport à l'autre.

Pour un schéma du redressement triphasé à simple alternance sont caractéristiques les rapports suivants entre les tensions, les courants et les puissances dans les éléments du redresseur.

La valeur moyenne de la tension redressée à vide

$$U_{d0} = 1,17 U_{2\text{simple}} . \quad (13.31)$$



**Figure 13.13** – Redresseurs triphasé à simple alternance :  
a – schema ; b – d – diagrammes temporels de tensions et de courants

La tension redressée contient une composante constante faisant  $U_d$  et une composante variable  $U_{d\sim}$ , dont la fréquence est triple par rapport à la fréquence du réseau. Le facteur d'ondulation de la tension de sortie du redresseur

$$q = 2/(m^2 - 1) = 2/(3^2 - 1) = 0,25 . \quad (13.32)$$

La tension inverse  $u_{\text{inv}}$ , appliquée à la vanne ne travaillant pas, est égal à la tension composée d'enroulement secondaire du transformateur, de sorte que l'anode de la vanne fermée est adjointe à une des phases, et sa cathode à travers la vanne travaillant est joint à une autre phase de l'enroulement secondaire. La figure 13.13, d montre la courbe de la tension inverse  $u_{\text{inv}}$  entre l'anode et la cathode de la vanne  $VD_1$ .

La signification maximale  $u_{\text{inv.max}}$  est égale à l'amplitude de la tension entre les phases (la tension composée) du bobinage secondaire du transformateur T :

$$U_{\text{inv.max}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\text{simple}} = 2,09 \cdot U_{d0} . \quad (13.33)$$

Le courant dans la charge est égal à la relation de la tension redressée entre à la résistance de la charge, c'est-à-dire  $i_d = u_d/R_d$ . La valeur moyenne du courant redressé dans la charge

$$I_d = \frac{U_{d0}}{R_d} = 1,17 \frac{U_{2.simple}}{R_d} . \quad (13.34)$$

Chaque valve dans le schéma fonctionne une seule fois pour la période pendant  $1/3 \cdot T$ . Donc, la valeur moyenne du courant à travers une vanne est à 3 fois moins que le courant de la charge, i.e.  $I_a = 1/3 \cdot I_d$ .

Valeur efficace du courant dans l'enroulement secondaire  $I_2$  et de la vanne  $I_{2,eff}$  est définie par la formule

$$I_2 = I_{2,eff} = \sqrt{3} \cdot I_a = 0,585 \cdot I_d . \quad (13.35)$$

Quand le nombre des phases des bobinages primaires et secondaires du transformateur T est le même ( $w_1 = w_2$ ) et les schémas de la liaison des bobinages sont identiques (étoile-étoile) la signification efficace du courant primaire de phase  $I_1$  est moins de la signification réduite du courant  $I_2'$ , puisque dans la courbe du courant du bobinage primaire la composante constante, qui n'est peut pas être transformée, est absente, c'est-à-dire

$$I_1 = \frac{1}{k_{mp}} \sqrt{I_2'^2 - I_a^2} \approx \frac{1}{k_{mp}} 0,47 I_d . \quad (13.36)$$

Le passage alternatif des courants unidirectionnels par les bobinages secondaires du transformateur, qui ne sont pas entièrement compensés par les courants du bobinage primaire, crée dans tous trois noyaux le flux  $\Phi_0$  d'une direction, dont la valeur change avec la fréquence triple conformément à la pulsation du courant anodique et lequel se renferme dans l'air et le boîtier du transformateur. La présence d'un flux monophasé ou forcée de magnétisation  $\Phi_0$  dans les noyaux conduit à l'augmentation du courant de magnétisation du transformateur, ainsi qu'à la nécessité d'augmenter la section du noyau pour éviter sa saturation.

La puissance typique du transformateur lors de la connexion des bobinages secondaires en étoile, sans tenir compte de l'augmentation de la masse du système magnétique, provoquée par la présence du flux  $\Phi_0$ , est égale :

$$S_{tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{3U_{1simple}I_1}{2} = 1,35 P_d . \quad (13.37)$$

**Schéma triphasé en pont** est montré sur la figure 13.14. Le redresseur dans ce schéma se compose d'un transformateur, dont les bobinages primaires et secondaires sont connectés en étoile ou triangle, et six diodes, qui peuvent être répartis en deux groupes :

1) cathodique ou impair (vannes  $VD_1, VD_3$  et  $VD_5$ ), dans lequel les cathodes de vannes sont reliées électriquement et leur borne générale est le pôle positif pour la chaîne extérieure, et les anodes sont adjointes aux bornes des enroulements secondaires du transformateur ;

2) anodique ou paire (vannes  $VD_2, VD_4$  et  $VD_6$ ), dans lequel les anodes de vannes sont reliées électriquement et les cathodes se lient avec les anodes du premier groupe. Le point commun de communication de l'anode est le pôle négatif pour la chaîne extérieure.



Le groupe cathodique des vannes répète le mode du schéma triphasé nul. Dans ce groupe de vannes pendant chaque tiers de la période fonctionne une vanne avec le plus haut potentiel de l'anode (voir la figure 13.14, *b*). Dans le groupe anodique dans cette partie de la période fonctionne une vanne dont la cathode a le potentiel le plus négatif par rapport au point total des anodes.

Les vannes du groupe cathodique s'ouvrent au moment de l'intersection des terrains positifs des sinusoïdes (voir les points *a*, *b*, *c* et *d* sur la figure 13.14, *b*), tandis que les vannes du groupe anodique – au moment de l'intersection des terrains négatifs des sinusoïdes (les points *e*, *f*, *g* et *h*). Chacune des vannes travaille pendant un tiers de période (voir la figure 13.14, *f*).

À la commutation instantanée du courant dans le couplage en pont triphasé à n'importe quel moment du temps deux vannes passent le courant – une du groupe cathodique, l'autre – du groupe anodique, de plus n'importe quelle vanne d'un groupe travaille alternativement avec deux vannes d'autre groupe, qui sont reliés aux différentes phases du bobinage secondaire (fig. 13.14, *d* et *e*). Le courant  $i_2$  passera dans chaque phase du transformateur pendant  $2/3$  de période:  $1/3$  de période – positif et  $1/3$  de période – négatif. Le courant  $i_d$  dans la charge se déroule tout le temps dans une sens.

Pendant l'intervalle ouvrer simultanément passent les courants dans les bobinages secondaires, situés sur de différents pivots du système magnétique (voir les courants  $i_{a2}$  et  $i_{b2}$  sur la figure 13.14, *a*), de plus dans deux bobinages primaires disposés sur les mêmes pivots, passent aussi les courants. Les forces magnétisantes des courants  $i_1$  et  $i_2$  sur chacun des pivots sont équilibrées dans ce cas, et le flux unidirectionnel  $\Phi_0$  n'apparaît pas.

La tension redressée  $u_d$  dans ce schéma est décrite par la partie supérieure des courbes des tensions composée  $u_{2comp}$  (la courbe pointillé sur la figure. 13.14, *c*). La fréquence des pulsations de la courbe  $u_d$  est égale  $6 \cdot f_1$ , le facteur d'ondulation de la tension de sortie du redresseur est égal :

$$q = \frac{U_{\max}}{U_{d0}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057. \quad (13.38)$$

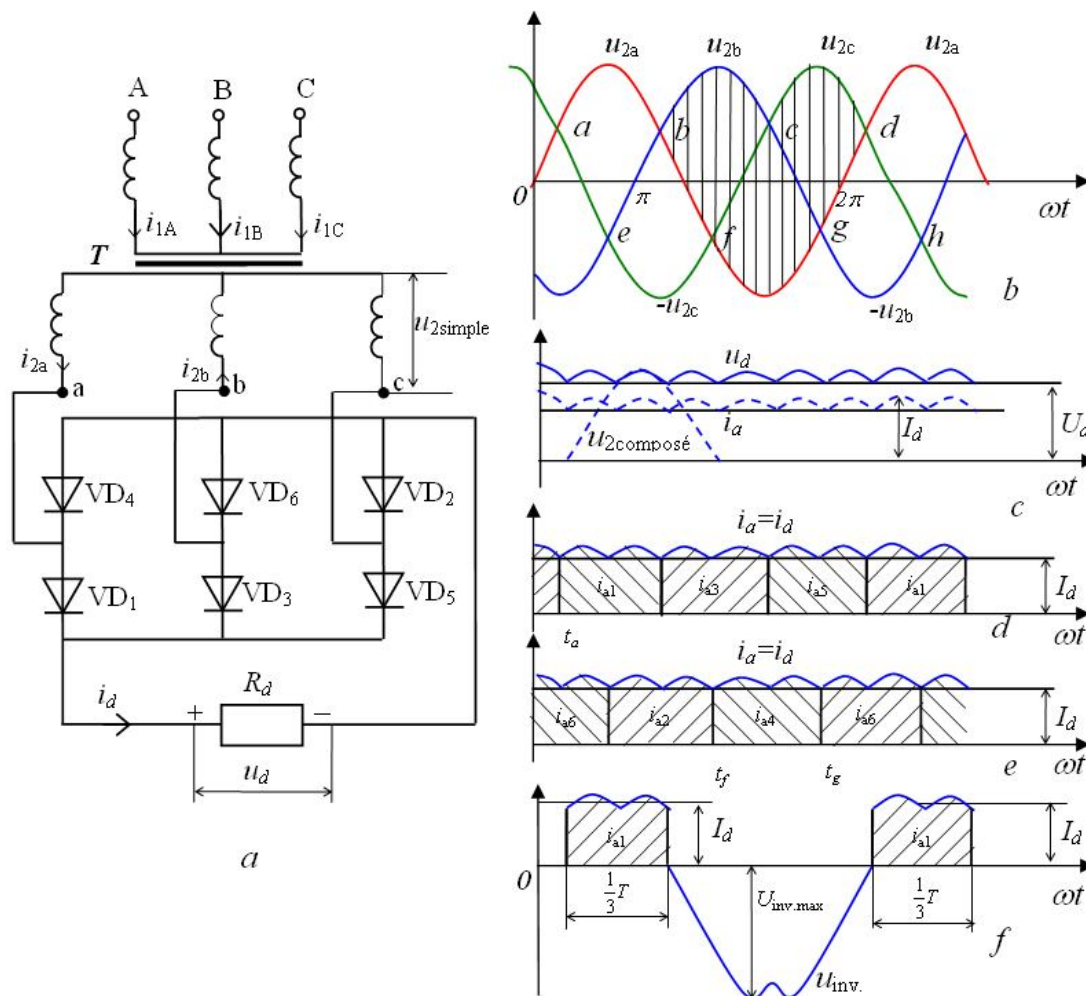
La tension inverse sur la vanne fermée est défini par la différence des potentiels de sa cathode et l'anode. Les ordonnées de la courbe  $u_{inv.}$  pour la vanne  $VD_1$  sont montrées sur la figure 13.14, *b* par la hachure, et sur la figure 13.13, *f* la courbe  $u_{inv.}$  est montré entièrement.

La valeur maximale de la tension inverse de la vanne dans un schéma triphasé en pont est égale à l'amplitude de la tension composée de l'enroulement secondaire du transformateur.

Le courant redressé  $i_d$  au travail sur la charge purement active répète entièrement la courbe  $u_d$  (voir la courbe pointillée sur la figure 13.13, *c*).

Les rapports entre les tensions et les courants dans le couplage en pont triphasé sont amenés dans le tableau 13.1.

Nous comparerons les dignités des schémas du redressement triphasé aux significations identiques de la puissance  $P_d$ , de la tension  $U_d$ , l'absence du couplage des diodes en parallèle et en série dans les épaules du redresseur.



**Figure 13.14** – Redresseurs triphasé en pont :  
a – schéma ; b – e – diagrammes temporels des tensions et des courants

#### ***Le schéma triphasé avec le point nul :***

1. Le couplage est simple. Nombre de vannes à 2 fois moins que dans le couplage en pont.

2. Les pertes dans les vannes sont moins, puisque dans ce schéma le courant passe à travers une diode, et dans le couplage en pont – successivement par deux diodes.

#### ***Le schéma triphasé en pont :***

1. La tension inverse, mis aux vannes, à deux fois moins que dans le schéma avec le zéro.

2. La tension (le nombre des spires) de l'enroulement secondaire est à deux fois plus petit, mais la section du fil est à  $\sqrt{2}$  fois de plus.

3. Il n'y a pas de magnétisation forcée du noyau. L'exécution normale des bobinages du transformateur.

4. La puissance dimensionnelle du transformateur est à 30 % moins que dans le schéma avec le zéro, le courant du bobinage primaire a la forme de la sinusoïde.

Lors de l'application des vannes de semi-conductrices l'avantage a le couplage en pont, qui peut travailler directement du réseau, si la tension  $U_1$

s'approche par la valeur pour obtenir la valeur souhaitée  $U_d$  et on ne demande pas l'isolation du réseau d'alimentation de la chaîne du courant redressé.

**13.2.3 Redresseurs commandés.** Dans de nombreux cas pratiques, les redresseurs doivent assurer la possibilité du réglage continu de la valeur moyenne de la tension redressée  $U_d$ , par exemple pour la régulation de la fréquence de rotation des MCC, lors de la recharge de la batterie, etc.

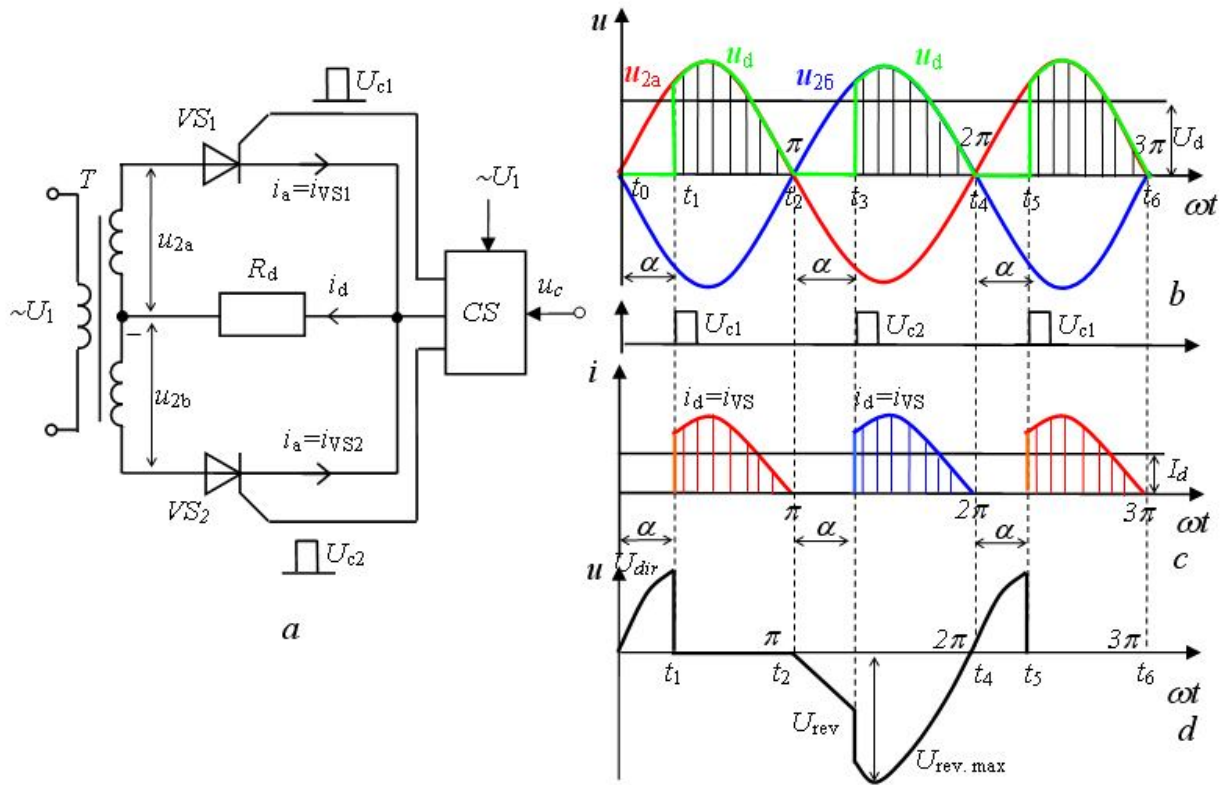
Lors de l'utilisation dans les redresseurs des diodes non commandé la valeur moyenne de la tension redressée  $U_d$ , comme cela est évident à partir des expressions (13.19), (13.31) et du tableau 13.2, est en proportion de la tension  $U_{2\text{simple}}$ . Par conséquent, le réglage  $U_d$  est possible dans ce cas seulement aux frais du changement de la tension du bobinage secondaire du transformateur que n'est pas toujours confortable.

L'application dans les schémas du redressement des diodes commandés (des thyristors) donne plus de possibilités pour le réglage de la tension redressée.

**Principe de l'action du redresseur commandé.** Sur la figure 13.15, *a* est représenté un schéma monophasé avec le point nul du redresseur commandé, qui se distingue du schéma sur la figure 13.11, *a* par ce que les diodes non commandé  $VD_1$  et  $VD_2$  sont remplacées par les thyristors  $VS_1$  et  $VS_2$ . Les anodes des thyristors sont connectées aux bornes du bobinage secondaire, et les électrodes de commande sont liées au système de commande (SC), qui forme synchronement avec la tension du réseau les impulsions de commande des tensions  $U_{\text{comm.1}}$  et  $U_{\text{comm.2}}$  et permet de changer leur phase par rapport aux tensions des phases  $u_{2a}$  et  $u_{2b}$  de la source d'alimentation.

Lors de l'utilisation dans un schéma des diodes non commandés la diode  $VD_1$  serait ouvert au moment du temps  $t_0$  (fig. 13.15, *b*), qui est un moment de l'ouverture naturelle de la diode. Thyristor, comme était indiqué dans le chapitre 13.3.1, s'ouvre lors de la présence d'une tension positive sur l'anode et d'une impulsion d'ouvrant sur l'électrode de commande. Supposons qu'à l'électrode de commande du thyristor  $VS_1$  l'impulsion ouvrant  $U_{\text{com1}}$  sera donnée au moment  $t_1$ , par conséquent, il s'ouvrira avec un certain retard par rapport au début de la tension positive  $u_{2a}$ , à la suite de quoi en l'intervalle  $t_0 - t_1$  la tension sur la charge  $R_d$  sera égale à zéro, car les deux thyristor  $VS_1$  et  $VS_2$  sont fermés.

L'angle de retard compté du moment de l'ouverture naturelle de la diode, exprimé dans les degrés électriques, s'appelle ***l'angle de commande*** et est désigné par la lettre grecque  $\alpha$ . Au moment de l'ouverture du thyristor  $VS_1$  la tension  $u_d$  sur la charge  $R_d$  augmente par le saut et change ensuite selon la courbe de la tension de phase  $u_{2a}$ . Au moment  $t_2$  la tension  $u_{2a}$  change le signe, le thyristor  $VS_1$  est fermé, dans l'intervalle  $t_2 - t_3$  les deux thyristors seront fermés et le courant  $i_d$  dans la charge ne passe pas, et au moment  $t_3$  le thyristor  $VS_2$  entre dans le travail et il reste ouvert jusqu'au moment  $t_4$ . Ensuite dans l'intervalle égal à l'angle  $\alpha$ , de nouveau le thyristor  $VS_1$  entrera dans le travail, etc.



**Figure 13.15** – Redresseur commandé monophasé double alternance :  
a – schéma ; b–d – diagramme temporels des tensions et des courants

Lors de fonctionnement du redresseur sur la charge active la courbe du courant redressé  $i_d$  répète entièrement la forme de la courbe de la tension  $u_d$  (fig. 13.15, b et c). Sur la figure 13.15, d on construit la courbe de la tension inverse  $u_{inv}$  sur thyristor  $VS_1$  pour le cas du travail du schéma avec l'angle du réglage  $\alpha = 60^\circ$ . Dans l'intervalle  $t_0-t_2$  au thyristor  $VS_1$  on met la tension directe  $u_{dir} = u_{2a}$ , dans l'intervalle  $t_1-t_2$  thyristor  $VS_1$  est ouvert et sa chute de potentiel est pratiquement également au zéro. Au moment  $t_2$ , quand le courant  $i_d$  est égal au zéro, le thyristor  $VS_1$  se ferme et se trouve sous une tension inverse égal à la tension de phases  $-u_{2a}$ , puisque le thyristor  $VS_2$  est aussi fermé. Au moment  $t_3 = \pi + \alpha$  le thyristor  $VS_2$  s'ouvre et le thyristor  $VS_1$  se trouve sous la tension du bobinage secondaire du transformateur, qui agira sur lui jusqu'au moment  $t_4 = 2\pi$ , quand thyristor  $VS_2$  se fermera. Par la suite les procès dans le schéma se répéteront dans chaque période.

Il est évident que si changer l'angle  $\alpha$  (changer selon la phase les impulsions de commandes  $U_c$  en ce qui concerne la tension sur les anodes des thyristors), sera modifiée de temps de travail des thyristors et en conséquence la valeur de la tension redressée, dont la valeur moyenne sera déterminée par l'expression

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (13.39)$$

où  $U_{d0}$  – la plus grande valeur de la tension redressée aux thyristors  $VS_1$  et  $VS_2$  entièrement ouverte ( $\alpha = 0$ ) peut être calculé selon la formule (13.19).

Au fonctionnement du redresseur sur la charge active et le réglage de la tension redressée de 0 jusqu'à  $U_{d0}$ , comme on voit de la formule (13.39), il est nécessaire de changer l'angle de commande  $\alpha$  de  $\alpha_{\max} = 180^\circ$  jusqu'à  $\alpha_{\min} = 0$ . En effet, si  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos 180^\circ = -1$  et  $U_d = 0$ ; et à  $\alpha = 0$   $\cos 0 = 1$  et  $U_d = U_{d0} = 0,9 \cdot U_{2\phi}$ .

Donc, le mode de travail du redresseur non commandé est limite auquel s'approche le redresseur commandé l'angle de commande  $\alpha = 0$ .

À la différence du redresseur non commandé, dont les diodes subissent seulement la tension inverse, les diodes du redresseur commandé doivent subir la tension comme direct, ainsi que la tension inverse. À la charge active la valeur maximale de la tension inverse sur le thyristor fermé au demi-cycle donné aux angles  $\alpha < 90^\circ$  est égale à l'amplitude de la tension de tout le bobinage secondaire du transformateur et (comme dans le schéma non commandé) est défini par l'expression (13.20).

La valeur de la tension directe  $U_{\text{dir}}$  sur le thyristor fermé à  $\alpha < 90^\circ$  dépend de l'angle du commande comme il suit :

$$U_{\text{dir}} = \sqrt{2} \sin \alpha. \quad (13.40)$$

Lorsque  $\alpha = 90^\circ$ , la valeur  $U_{\text{dir}}$  atteint du maximum. La valeur moyenne du courant redressé sont définis comme  $I_d = U_d/R_d$ , où  $U_d$  on peut calculer par la formule (13.39). Lorsque l'angle de commande  $\alpha = 0$ , dans la charge il y aura le plus grand courant  $I_d = U_{d0}/R_d$ .

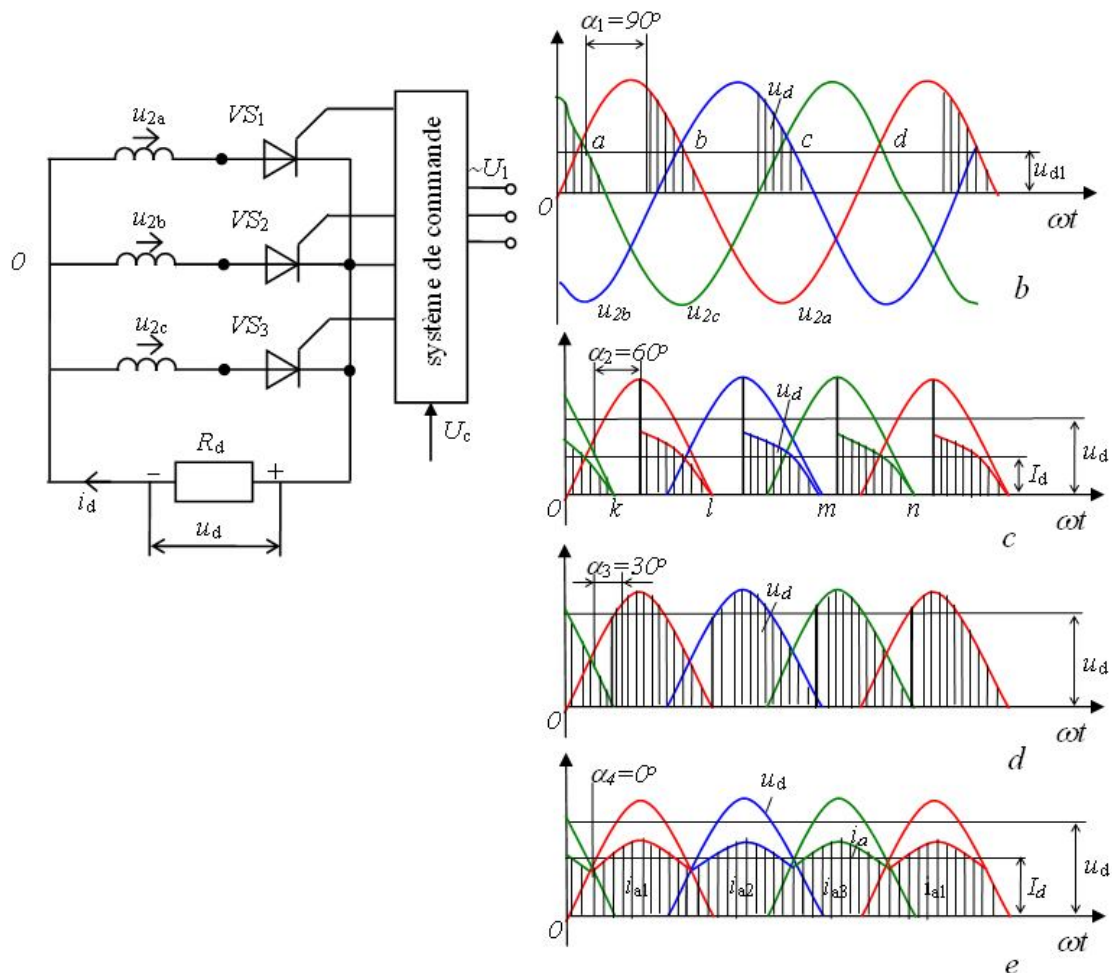
La valeur moyenne du courant à travers le thyristor  $I_{a.m.} = 0,5 I_d$ , la valeur efficace du courant du thyristor  $I_{a.\text{eff}}$  et l'enroulement secondaire du transformateur  $I_2$ , ainsi que du courant de son enroulement primaire  $I_1$ , lorsque  $\alpha = 0$ , sont définis respectivement par les formules (13.22) et (13.24). Les rapports quantitatifs entre d'autres grandeurs de schéma monophasé avec le point neutre sur les valves commandées sont présentés dans le tableau 13.1.

Le travail du couplage en pont monophasé à thyristors se distingue du travail du schéma d'un redresser monophasé avec le point nul sur les diodes par ce que les impulsions de commande doivent être données simultanément sur deux thyristor, disposé aux épaules opposées d'un redresseur en pont.

Les courbes de la tension redressée  $u_d$  et du courant redressé  $I_d$  d'un couplage en pont monophasé sur thyristor sont analogiques à celles de la courbe de schéma d'un redresser monophasé avec le point nul sur les diodes. Les rapports quantitatifs aux courants et les tensions du schéma sont donnés dans le tableau 13.1.

**Dans le schéma triphasé à point neutre avec thyristors** (fig. 13.16, a) les impulsions de commandes sont données avec un certain déplacement dans le temps par rapport au moment de l'ouverture naturel des diodes dans le schéma non commandé, qui correspond aux points d'intersection des sinusoïdes des tensions des phases (les points  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sur la figure 13.16, b).

Supposons, par exemple, que les impulsions de commande soient appliquées à thyristors  $VS_1$ ,  $VS_2$ ,  $VS_3$  dans les moments correspondant au milieu des demi-ondes positives des tensions de phase (ce qui correspond à l'angle  $\alpha = 60^\circ$ ). Dans ce cas, sur la charge apparaissent des impulsions de la tension redressée  $u_d$  en forme du quart de la sinusoïde (fig. 13.16, c).



**Figure 13.16** – Redresseur commandé à thyristor avec point neutre :  
*a* – schéma ; *b–e* – diagrammes temporels des tensions et des courants

Le changement de phase (déplacement) des impulsions de commande dans le sens de l'augmentation ou de la réduction de l'angle de commande  $\alpha$  provoque une réduction correspondante (fig. 3.16, *b*) ou une augmentation (fig. 13.16, *g*) les impulsions de tension  $u_d$ . A l'angle  $\alpha = 0$  courbe de la tension redressée (fig. 13.16, *e*) aura la même forme, comme dans le redresseur non commandé (fig. 13.13, *b*). Il est évident que la courbe du courant  $i_d$  par sa forme répètera la courbe de la tension redressée  $u_d$  au fonctionnement du redresseur sur la charge active.

À partir de ces courbes on voit qu'il y a deux domaines caractéristiques de travail du redresseur dirigé. La première correspond à la variation de l'angle de commande dans la limite de  $0 < \alpha < 30^\circ$ , de plus le courant redressé sera continu et la valeur moyenne de la tension redressée est déterminé par l'expression

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (13.41)$$

Chaque thyristor fonctionne dans ce cas un tiers de la période. La seconde zone correspond à angles  $\alpha > 30^\circ$  et est caractérisé en ce que lors du passage de la phase de tensions à zéro (point *k, l, m, n* sur la figure 13.16, *c*) le thyristor travaillant se ferme, et comme sur le thyristor suivant, entrant dans le travail, l'impulsion ouvrant n'est pas encore déposé, dans la courbe de la tension redressée apparaissent les pauses (les terrains nuls), pendant laquelle le courant  $i_d = 0$ .

La durée de passage du courant à travers une vanne dans ce cas, sera moins de 1/3 et les valeurs moyennes de la tension redressée sont calculés par la formule

$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{d0} [1 + \cos(30^\circ + \alpha)]. \quad (13.42)$$

Pour le schéma triphasé à point neutre au travail sur la charge active par l'angle limite du commande, dont  $U_d = 0$ , est l'angle  $\alpha_{\text{макс}} = 150^\circ$ . La tension sur une vanne est défini par la différence des potentiels de l'anode et le point total des cathodes, dont le potentiel change selon la courbe de la tension  $u_d$ . La valeur maximale de la tension inverse sur le thyristor, ainsi que dans le schéma avec les vannes non commandées, est égal à l'amplitude de la tension  $u_{2\text{composé}}$  (voir l'équation (13.33)).

**Dans le couplage en pont triphasé à thyristors** (voire la figure 13.17, *a*), de même, comme dans le couplage à diodes non commandées, deux thyristors travaillent simultanément: un du groupe cathodique (impair), l'autre du groupe anodique (pair), et la charge à tout moment se joint à deux phases de l'enroulement secondaire du transformateur. On met les impulsions ouvrant sur thyristors du groupe impair à l'avance sur  $180^\circ$  par rapport aux thyristors du groupes paire, connectés vers les mêmes bornes du bobinage secondaire, puisque les premiers travaillent aux significations positives des tensions de phase sur des anodes, et le second – des tensions négatives sur les cathodes.

Les impulsions d'ouverture à thyristors du groupe impair sont données à l'avance sur  $180^\circ$  par rapport aux thyristors du groupe paire connectés vers les mêmes bornes du bobinage secondaire, de sorte que les premiers travaillent pour des valeurs positives des tensions des phases sur des anodes, et le second – des valeurs négatives sur les cathodes.

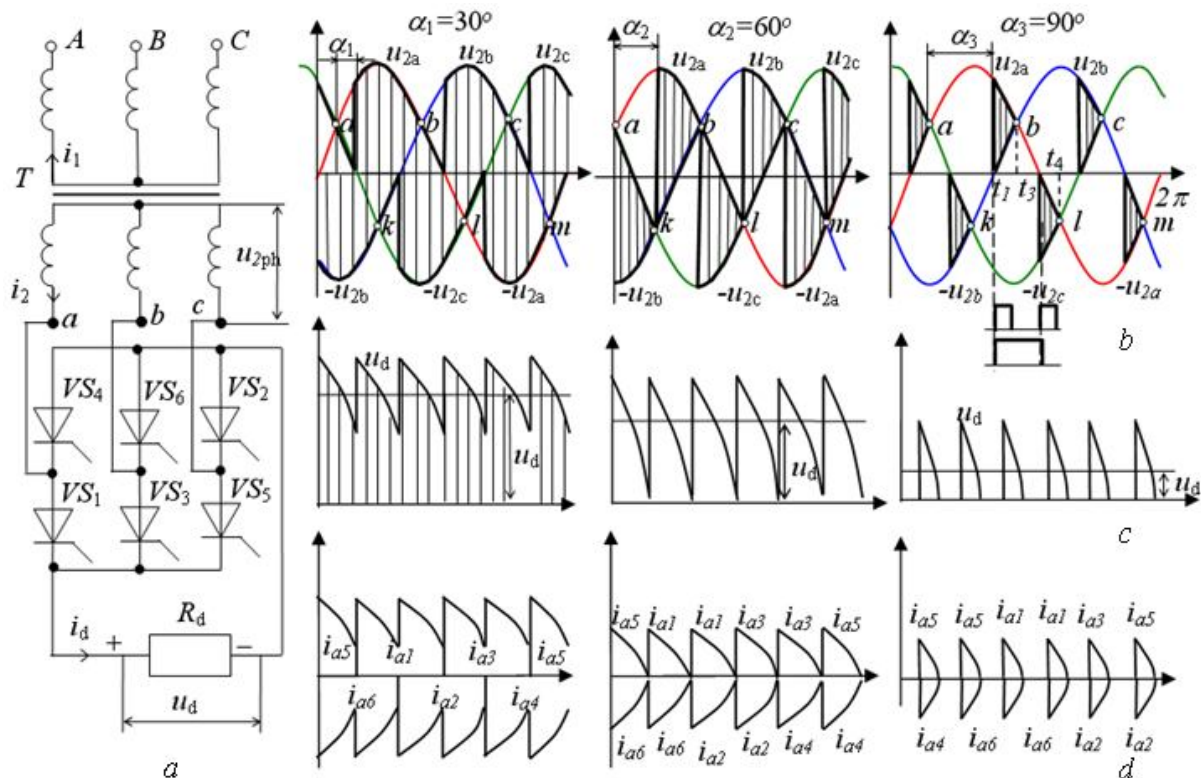
Le travail du schéma examiné du redressement est illustré par les diagrammes des significations instantanées des tensions simples sur thyristors (voir fig. 13.17, *b*); par les courbes de la tension redressée  $u_d$  (voir fig. 13.17, *c*), qui sont obtenu en additionnant les valeurs instantanées des tensions des thyristors, travaillant au moment donné; par les courbes des courants anodiques (fig. 13.17, *d*) de groupe cathodique – sur l'axe du temps, le groupe anodique – sous l'axe. Chacun des diagrammes est construit pour trois significations des angles de retard :  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 60^\circ$  et  $\alpha_3 = 90^\circ$ .

Lorsque l'angle de retard  $\alpha = 0$  il est nécessaire de donner les impulsions d'ouverture à thyristors aux moments, correspondant aux points d'intersection des courbes des tensions de phase (voir les points *a, b, c* et *k, l, m* sur la figure 13.17, *b*). Dans ce cas, chaque thyristor conduit le courant pendant 1/3 de la période, comme dans un schéma pas commandé, et l'alternance des paires de thyristors travaillant se produit au bout de  $60^\circ$  (fig. 13.17, *c*).

A la charge active jusqu'à ce que l'angle de retard  $\alpha \ll 60^\circ$ , les courbes de la tension redressée, et donc des courbes de courant redressé (fig. 13.17, *c* et *d*) sont continues. Pour ce mode ( $0 \ll \alpha \ll 60^\circ$ ) la valeur moyenne de la tension redressée est définie par l'expression (13.35). Comme le montre la figure 13.17, *d*, le courant peut passer par entrant dans le travail thyristor seulement à condition que s'ouvre simultanément ou est déjà ouvert le thyristor correspondant (contigu



selon le numéro d'ordre) de l'autre épaule du pont. Dans le cas contraire, le circuit du courant ne sera pas fermé et thyristor suivant, qui entre dans le travail, ne s'ouvrira pas.



**Figure 13.17** – Couplage en pont triphasé :  
a – schéma ; b–d – diagrammes temporels des tensions et des courants

Le circuit de commande de redresseur doit être construit de telle sorte, qu'au moment de l'application de l'impulsion ouvrant sur un thyristor, entrant dans le travail, d'une épaule du pont, simultanément on applique l'impulsion ouvrant sur l'électrode de commande de thyristor de la phase étant en arrière de l'épaule opposée du pont.

Par exemple, au fonctionnement du redresseur avec  $\alpha = 90^\circ$  (voir fig. 13.17, b) pour ouvrir le thyristor  $VS_1$  au moment  $t_1$  il est nécessaire simultanément donner l'impulsion ouvrant et sur le thyristor  $VS_2$ , après quoi les deux thyristors passeront le courant jusqu'à moment  $t_2$ , lorsque la différence des valeurs instantanées de la tension  $u_{2d}$  et  $u_2$  sera égal à zéro et les thyristors  $VS_1$  et  $VS_2$  se fermeront. Puis, au moment de  $t_3$  thyristor  $VS_3$  doit entrer dans travail. Il s'ouvrira seulement à la condition de la présence d'une impulsion réitérée ouvrant sur thyristor  $VS_3$  ou à condition que sur la gâchette de ce thyristor au moment  $t_1$  on donne l'impulsion par la durée de plus de  $60^\circ$ . Les thyristors  $VS_1$  et  $VS_2$  passeront le courant jusqu'au moment  $t_4$ , ensuite entrera dans le travail la paire suivante de thyristors  $VS_2$  et  $VS_3$ , etc.

La valeur moyenne de la tension redressée, quand le courant  $i_d$  est intermittent ( $\alpha > 60^\circ$ ), est définie par l'expression

$$U_d = U_{d0} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]. \quad (13.43)$$



De la formule (13.43) il s'ensuit qu'au fonctionnement du schéma donné sur la charge active par l'angle de retard, à qui  $u_d = 0$ , est l'angle  $\alpha_{\text{макс}} = 120^\circ$ .

À partir de la formule (13.37) que lors de l'utilisation de ce schéma dans la charge active à la limite de l'angle de régulation où  $d = 0$ ,  $\alpha$  est l'angle de  $\alpha_{\text{max}} = 120^\circ$ .

### 13.3 Filtres de courant redressé

La présence des pulsations de la tension redressée aggrave le travail des consommateurs alimentés par redresseurs. Par exemple, à l'alimentation des moteurs du courant continu par la tension pulsée s'aggravent les conditions de la commutation du courant et augmentent les pertes dans le moteur. En cas d'alimentation d'équipement radio les pulsations de la tension  $u_d$  aggravent rudement le travail des installations, en créant sur la sortie des amplificateurs le fond, i.e. les hésitations supplémentaires de la tension de sortie de la fréquence basse. En conséquence de cela les pulsations de la tension aux bornes de la charge doivent être réduites aux significations, à qui ne se ferait pas sentir leur influence négative sur le travail des installations.

Pour réduire l'ondulation de la tension chez le consommateur à la sortie du redresseur on installe un appareil spécial appelé un **filtre de nivellement**. Le schéma de l'insertion du filtre F est amené sur la figure 13.18, a.

L'ondulation de la tension à la sortie du redresseur est caractérisée par un **facteur d'ondulation  $q$** , qui est égal à la relation de l'amplitude du premier harmonique de pulsation  $U_{1\sim}$  à la composante constante de la tension redressée  $U_d$ , i.e.  $q = U_{1\sim}/U_{d.\text{charge}}$ .

L'ondulation de la tension aux bornes de la charge est caractérisée par un **facteur d'ondulation  $q_1$** , qui est égal à la relation de l'amplitude du premier harmonique de pulsation  $U_{d\sim}$  sur la charge (après le filtre) à la tension redressée  $U_{d.\text{charge}}$  aux bornes de la charge, i.e.  $q_1 = U_{d\sim}/U_{d.\text{charge}}$ .

L'ondulation de tension sur la charge est défini par les conditions de travail du consommateur, et l'ondulation de la tension sur l'entrée du redresseur est connue après le choix du schéma du redressement et la définition de ses paramètres. La relation des significations  $q$  et  $q_1$  détermine le degré de lissage de la tension redressée et est appelée **coefficient de lissage du filtre  $s$**  :

$$s = \frac{q}{q_1} = \frac{U_{1\sim}}{U_d} : \frac{U_{d\sim}}{U_{d.\text{charge}}} \quad (13.44)$$

À côté de l'affaiblissement de la composante variable de la tension redressée le filtre de nivellement diminue la composante constante ( $U_{d.\text{charge}} = U_d - \Delta U_f$ ). Évidemment, il y a moins de degré de la réduction de la composante constante ( $U_d/U_{d.\text{charge}}$ ) à l'affaiblissement invariable de la variable ( $U_{d\sim}/U_{1\sim}$ ), il y aura plus qualitativement un filtre. Pour les filtres des redresseurs de faible puissance la relation des composantes constants des tensions se fait d'habitude  $U_d/U_{d.\text{charge}} = 1,05-1$ , et pour les redresseurs de grande puissance  $U_d/U_{d.\text{charge}} = 1,005-1,01$ .

Dans les calculs de pratique, on peut considérer que  $U_d \approx U_{d,charge}$  et le coefficient de lissage, montrant dans ce cas le degré d'affaiblissement de la composante variable de la tension redressée par filtre, accepter égale à  $s = q/q_1 \approx U_{\sim}/U_{d\sim}$ .

Examinons les principaux types des filtres de nivellement.

**Filtre capacitif** (fig. 13.18, *b*) représente le condensateur  $C_f$ , inclus en parallèle avec la résistance de charge  $R_d$ . Il fait shuntage de la charge par la petite capacitance  $x_c = 1/\omega C \ll R_d$  et pour la composante variable du courant  $i_d = i_c$ , il crée dans le redresseur la chute de tension supplémentaire  $\Delta U_a$  sur  $R_a$  (fig. 13.18, *d*), ce qui conduit à un lissage de la tension  $U_d$ . Dans ce cas, on peut considérer que par  $R_d$  passe seulement la composante constante du courant  $I_d$ , et la composante variable du courant  $i_{d\sim}$  passe entièrement par le condensateur.

Le filtre capacitif est plus effectif dans les redresseurs aux faibles courants  $I_d$  (avec grand  $R_d$ ), puisque dans un tel filtre il est plus facile de recevoir l'inégalité  $\omega C_f \gg 1/R_d$  avec de petites valeurs de la capacité de  $C_f$ .

Lors du calcul de la capacité du filtre on prend comme la valeur demandée le facteur d'ondulation  $q_1$ , ainsi que les valeurs de la fréquence angulaire  $\omega_{source} = 2\pi \cdot f_1$  de la source d'alimentation et de la résistance de charge  $R_d$ . La valeur de la  $C_f$  (à  $\mu F$ ) peut être déterminée à partir de l'expression :

$$C_f = \frac{1}{m \cdot \omega_{source} \cdot q_1} \frac{10^6}{R_d}. \quad (13.45)$$

**Filtre inductif** (fig. 13.18, *c*) représente une bobine d'arrêt  $L_f$  insérée successivement avec la charge et possédant une grande résistance réactive  $x_L = \omega_{source} \cdot L_f$  pour la composante variable du courant redressé, qui diminue considérablement, et la chute de potentiel  $\Delta U_{d\sim}$  de cette composante sur la résistance  $R_d$  devient insignifiante (fig. 13.18, *e*).

Pour un bon effacement de l'effort sur la charge il est nécessaire que

$$x_L = \omega_1 \cdot L_f \gg R_d. \quad (13.46)$$

En prenant en compte le coefficient de lissage  $s$ , la valeur nécessaire de l'inductance du filtre  $L_f$  (à henry), compte tenu de la condition (13.40), est déterminée par l'expression :

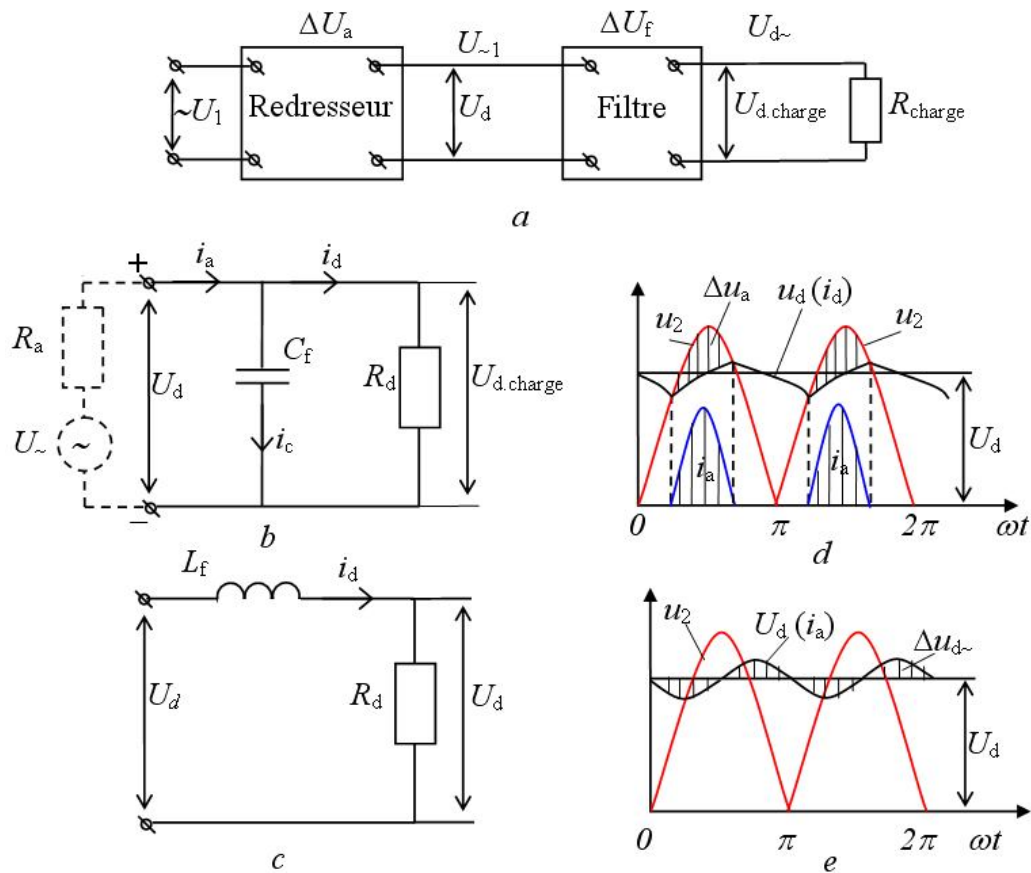
$$L_f = \frac{s \cdot R_d}{2\pi \cdot f_{source} \cdot m}, \quad (13.47)$$

où :

$f_{source}$  – fréquence de la tension du réseau, Hz ;

$m$  – le nombre des phases du redressement.

L'analyse de la formule (13.47) montre que la même valeur du coefficient  $s$  peut être reçue à ceux-là les significations de l'inductance  $L_f$ , qu'il est plus faible la résistance de la charge  $R_d$ . Ainsi, *il est avantageux d'appliquer le filtre inductif dans les redresseurs moyen et de grande puissance, dont la résistance de la charge est faible.*



**Figure 13.18** – Schémas de l'insertion des filtres :  
 a – schéma bloc d'un redresseur avec un filtre ;  
 b – filtre capacitif ; c – filtre inductif ;  
 d et e – diagrammes des tensions et des courants

S'il faut avoir une très petite valeur du facteur d'ondulation  $q_1$ , la capacité de  $C_f$  ou de l'inductance  $L_f$ , utilisés comme des filtres les plus simples, peuvent être considérables. Dans tels cas on applique les filtres plus complexes en  $\Gamma$  ou en  $\Pi$  [17, 34].

### 13.4 Amplificateurs

Les **amplificateurs** s'appellent les **installations destinées à l'augmentation des valeurs des paramètres des signaux électriques aux frais de l'énergie de la source d'alimentation insérée**. Les amplificateurs sont appliqués pour le renforcement principal des valeurs des paramètres de signaux. Sur cette base, ils sont divisés sur les amplificateurs de tension, de courant et de puissance.

Les modes linéaires et non linéaires de l'amplificateur sont possibles. Les amplificateurs avec le mode pratiquement linéaire font un minimum de distorsion de la forme du signal étant amplifié. La distorsion du signal sera minimale, si sans distorsion seront amplifiés toutes ses composantes harmonieuses. La propriété de l'amplificateur d'augmenter l'amplitude des composantes harmonieuses du signal caractérise sa **caractéristique amplitude-fréquence (CAF)**. Selon le type de CAF on distingue :

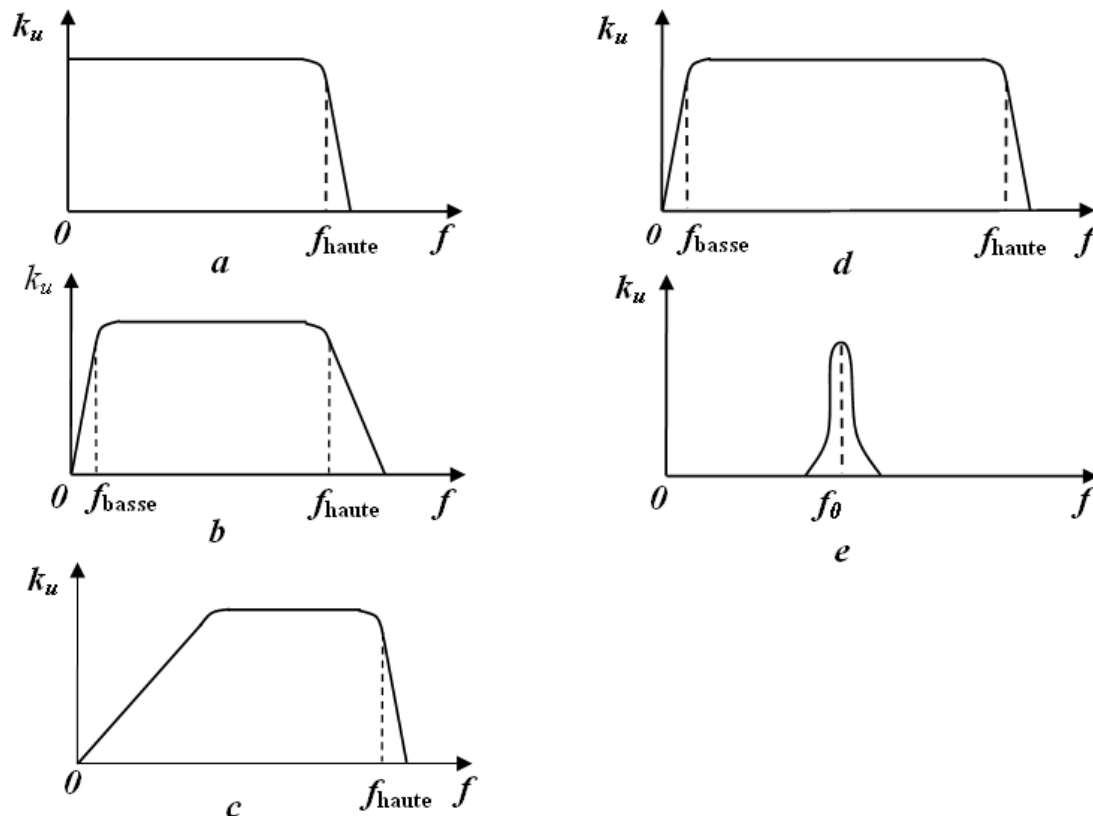
les amplificateurs des tensions et des courants qui changent lentement, ou les amplificateurs du courant continu (fig. 13.19, *a*) – la gamme du changement des signaux à amplifier de 0 à  $10^3$  Hz ;

les amplificateurs basses fréquences (fig. 13.19, *b*) – la gamme du changement des signaux à amplifier de 20–50 Hz à  $20 \cdot 10^3$  Hz ;

les amplificateurs de haute fréquence (fig. 13.19, *c*) – la gamme du changement des signaux à amplifier de  $10^4$ – $10^5$  Hz à  $10^7$ – $10^8$  Hz ;

les amplificateurs à large bande (fig. 13.19, *d*) – la gamme du changement des signaux à amplifier de 20–50 Hz à  $10^7$ – $10^8$  Hz ;

amplificateurs à bande étroite (fig. 13.19, *e*).



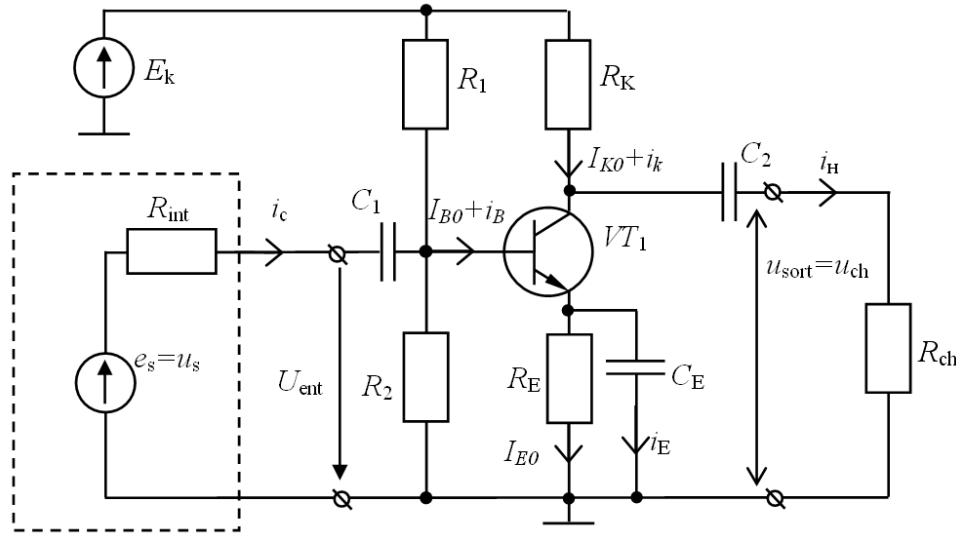
**Figure 13.19** – Caractéristiques amplitude-fréquence des amplificateurs

Dans les amplificateurs, dont le mode est non linéaire, à l'augmentation de la valeur de la tension d'entrée plus d'une certaine limite de niveau de variation, le changement de la tension sur la sortie de l'amplificateur est pratiquement absent. Tels amplificateurs sont appliqués particulièrement dans les appareils de la technique d'impulsion, y compris la logique.

À présent la technique d'amplification est fondée sur une large utilisation des amplificateurs sur les circuits intégrés, qui permettent de les appliquer pour la mise en œuvre de différentes des unités fonctionnelles des systèmes d'automatisation, de contrôle et de mesure.

Comme était indiqué dans le chapitre 13.1.4, dans la pratique on utilise trois schémas de l'insertion des transistors: à émetteur commun, à base commune et à collecteur commun. On applique en conséquence trois schémas amplificateurs à transistors.

Nous examinerons à titre d'exemple le principe du travail d'un étage standard amplificatrice à transistor bipolaire inséré selon le schéma à émetteur commun (fig. 13.20). La source du signal pour amplification, qui est montré à l'intérieur de la ligne de trait, représente la source avec une résistance interne  $R_{int}$  et une f.é.m.  $e_s=u_s$ .



**Figure 13.20** – Schéma d'un étage amplificatrice à émetteur commun

Les résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_K$  dans ce schéma assurent les significations nécessaires des tensions constants sur les jonctions émettrice et au collecteur lors d'alimentation de toutes les chaînes du transistor d'une source  $E_k$ . La résistance  $R_E$  assure la stabilisation en température du point de travail, ce qui est très essentiel pour des schémas amplificateurs à transistors. Avec la croissance de la température la composante constante du courant de l'émetteur  $I_{E0}$  augmente, en conséquence de quoi augmente la chute de potentiel  $R_E I_{E0}$  sur la résistance  $R_E$ . Le potentiel de l'émetteur en ce qui concerne la base baisse, ce qui diminue la composante constante du courant de la base et limite le degré de l'accroissement du courant du repos dans la chaîne du collecteur. Pour corriger cet effet lors du passage des composantes variables sur le circuit de transistor la résistance  $R_E$  est shunté par le condensateur  $C_E$ . Les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont destinés à empêcher de la pénétration de la composante constante du courant de la source d'alimentation et le signal sur la sortie et l'entrée de la cascade amplificatrice.

L'un des principaux indicateurs, caractérisant les propriétés de l'amplificateur, est son coefficient complexe du renforcement, qui dans le cas général peut être présenter comme la relation de la tension complexe sur la sortie de l'amplificateur vers la tension complexe de son entrée

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{sort} e^{j\psi_{sort}}}{\dot{U}_{entr} e^{j\psi_{entr}}} = K \cdot e^{j(\psi_{sort} - \psi_{entr})} = K \cdot e^{j\varphi}, \quad (13.48)$$

où :

$K = \frac{U_{sort}}{U_{entr}}$  – le module du gain de l'amplificateur ;

$\varphi = \psi_{\text{sort}} - \psi_{\text{entr}}$  – la différence des angles de phase du signal de sortie et d'entrée de l'amplificateur.

Les amplificateurs contiennent les combinaisons des éléments actifs et réactifs, de sorte que le module du gain d'amplification et la différence des angles de phase de sortie et l'entrée de l'amplificateur sont de fréquence-dépendant. Les domaines des fréquences (fig. 13.21) de 0 jusqu'à  $f_{\text{basse}}$  et de  $f_{\text{haute}}$  jusqu'à  $f = \infty$  se caractérisent par le changement considérable du gain d'amplification. Le *domaine du changement de la fréquence du signal d'entrée de  $f_{\text{basse}}$  jusqu'à  $f_{\text{haute}}$  s'appelle la **bande passante** de l'amplificateur et se caractérise par le changement insignifiant du gain d'amplification de la fréquence.*

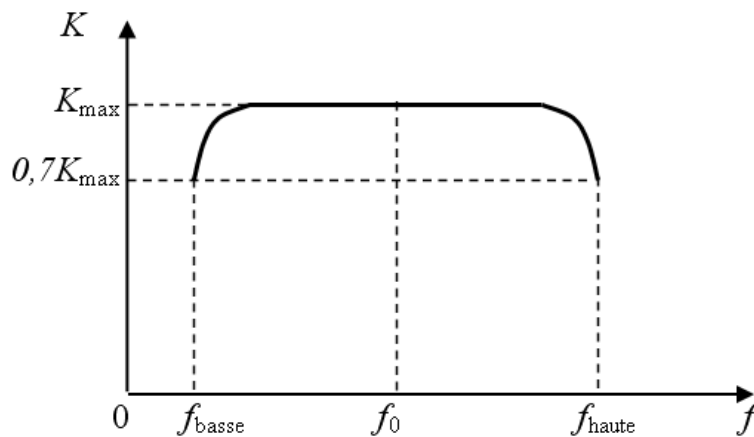


Figure 13.21 – CAF de l'amplificateur à émetteur commun

Afin obtenir les grandes significations des gains d'amplification dans la pratique on utilise les montages à plusieurs étages, dont un exemple pour le schéma à l'émetteur commun est présenté sur la figure 13.22.

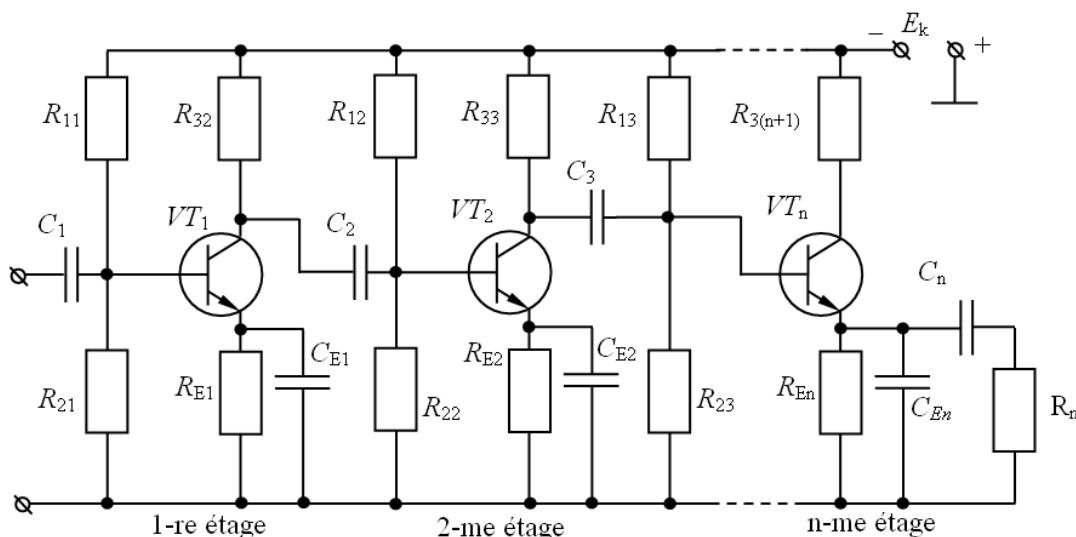


Figure 13.22 – Amplificateur à émetteur commun comprenant plusieurs étages

## Conclusions principales

1. Les jonctions P-N et N-P, utilisés dans la technologie des semi-conducteurs, ont la conductibilité unipolaire, ce qui assure les propriétés de redressement des diodes.

2. La diode commandée (thyristor) permet de régler la valeur du courant et, comme conséquence, régler la valeur de la tension redressée.

3. Le passage du thyristor de état fermé à l'état ouvert peut être réalisé :  
par application à l'anode de thyristor d'une tension directe excédant la tension de commutation;

par application à sa gâchette d'une impulsion positive lors de la tension direct sur l'anode du thyristor.

4. L'une des principales applications des transistors est le renforcement de signaux électriques.

5. Les pulsations de la tension redressée dépendent de schéma d'un redresseur et de la qualité du filtre de nivellement.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Expliquez le phénomène de la conductivité unipolaire des semi-conducteurs ?
2. Expliquez la caractéristique courant-tension de la jonction P-N ?
3. Expliquez la conception de diode au silicium ?
4. Quelles sont les particularités des diodes au germanium ?
5. Quelles sont les particularités des diodes au sélénium ?
6. Expliquez la conception de thyristor ?
7. Expliquez la caractéristique courant-tension d'un thyristor ?
8. Comment peut-on réaliser l'ouverture du thyristor ?
9. Expliquez la conception d'un transistor bipolaire ?
10. Quel couplage des transistors est appliqué en la pratique ?
11. Quelles sont les particularités de fonctionnement de montage à émetteur commun ?
12. Quelles sont les particularités de fonctionnement de montage à base commun ?
13. Quelles sont les particularités de fonctionnement de montage à collecteur commun ?
14. Expliquez le principe de fonctionnement d'un redresseur simple alternance monophasé ?
15. Quel est le principe de fonctionnement d'un redresseur monophasé schéma en pont ?
16. Quel est le principe de fonctionnement d'un redresseur triphasé schéma ?
17. Quel est le principe de fonctionnement d'un redresseur triphasé en pont ?
18. Quel est le principe de fonctionnement un redresseur commandée monophasé double alternance ?
19. Quel est le principe de fonctionnement d'un redresseur triphasé à point neutre ?
20. Quel est le principe de fonctionnement d'un redresseur triphasé en pont commandé ?
20. Quel est le principe de fonctionnement d'un filtre capacitif ?
21. Quel est le principe de fonctionnement d'un filtre inductif ?
22. Quel est le principe de fonctionnement d'un amplificateur à transistor bipolaire ?

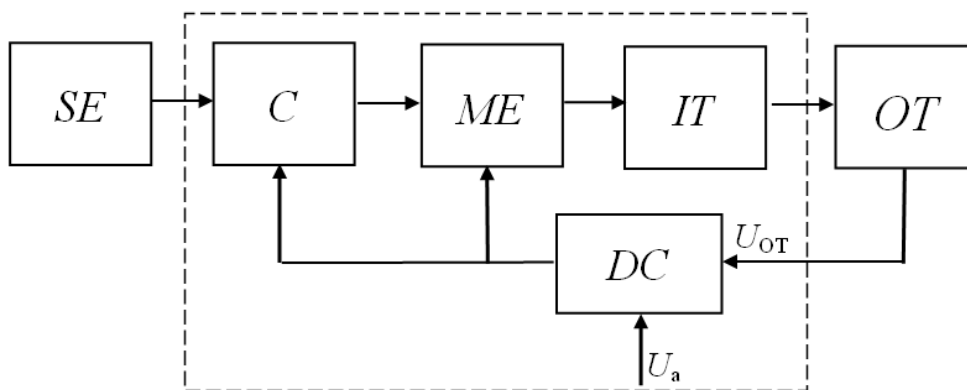
## Chapitre 14 : COMMANDE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

**Notions clés :** entraînement électrique,  $m$  ; liaison en retour,  $f$  ; commande automatisée,  $f$  ; entraînement électrique non réglable,  $m$  (réglable, asservie, programmable, adaptif) ; entraînement multiple,  $m$  (par moteur individuel, à plusieurs moteurs) ; couple d'inertie,  $m$  ; couple résistant (actif et réactif),  $m$  ; mode de fonctionnement permanent,  $m$  (transitoire, de courte durée, cadencé, établie) ; rigidité de caractéristique mécanique,  $f$  ; stabilité statique d'entraînement,  $f$ .

### 14.1 Informations générales

*L'entraînement électrique* c'est une installation (un ensemble de l'équipement) électromécanique destinée à l'automatisation des processus de travail.

Examinons les éléments de base du commande d'une machine électrique (fig. 14.1). Il est constitué d'un moteur électrique  $ME$ , d'installation de transmission ( $IT$ ), d'un convertisseur  $C$  et d'un dispositif de commande  $DC$ .



**Figure 14.1** – Schéma en blocs-diagrammes d'entraînement électrique

Dans un commande électrique, en fonction des exigences de l'application concernée, sont utilisés MCC à excitation indépendante, série, composée ou en dérivation, moteurs asynchrones, moteurs pas à pas etc. La tâche principale du moteur dans l'entraînement électrique est la conversion de l'électricité de source d'alimentation  $SE$  (en particulier, le réseau électrique) à l'énergie mécanique de l'arbre tournant (un moteur tournant) ou à énergie des masses se déplaçant de ligne (moteur linéaire). En d'autres termes, le moteur doit développer des forces d'entraînement : un couple ou une force mécanique transmise à l'organe de travail  $OT$ .

Dans certains cas, le moteur effectue la conversion inverse : l'énergie mécanique de rotation ou de déplacement linéaire, provenant de l'organe de travail, en énergie électrique. Dans ce cas, le moteur produit un couple de freinage.

Dans le commande électrique moderne le moteur entraîne  $OT$  par l'installation de transmission ( $IT$ ), qui baisse la fréquence de la rotation (réducteurs,



transmissions à courroies trapézoïdales, etc.) ou augmente, ou change le type de mouvement (mécanisme de crémaillère, de bielle-manivelle, etc.). Dans certains équipements l'électromoteur directement joint à l'organe de travail.

Un élément important de commande électrique est un convertisseur, dont la nécessité est due à des raisons suivantes. Premièrement, les commandes électriques doivent posséder la propriété de modifier la fréquence de rotation. Habituellement, on fait la régulation de tension et de la fréquence du courant consommé par le moteur. Dans le même temps, la fréquence et la tension de source d'alimentation sont invariables. Deuxièmement, pour le fonctionnement du moteur à courant continu il est nécessaire de connecter à ses bobinages une tension constante, et le réseau industriel a une tension variable. Par conséquent, pour son utilisation en tant que source d'alimentation il est nécessaire de transformer la tension alternative en tension continue.

Pour le réglage de la tension et la fréquence, ainsi que pour la transformation un niveau de tension à un autre on utilise les convertisseurs. Dans les entraînements électriques de grande puissance on applique les convertisseurs électromécaniques, dans les commandes électriques de moyen et faible puissance – les convertisseurs à transistors et à thyristors.

Un dispositif de commande (DC) est conçu pour la gestion de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique et pour garantir la qualité nécessaire du processus de fabrication. Sur le plan conceptuel c'est un ensemble des éléments électromagnétiques, électromécaniques, semi-conducteurs et d'autres, qui sont fonctionnellement reliés entre eux. Ces éléments incluent les boutons de commande et d'autres appareils de commande, des relais et des contacteurs, des blocs d'automatisation sans contacts, etc. Nombreux dispositifs modernes des commandes électriques de haute précision contiennent dans son système de gestion des complexes de calcul et des ordinateurs de destination spéciale.

La gestion de commande électrique se réalise par l'influence sur convertisseur  $C$  et moteur électrique  $ME$  des signaux de commande, élaborés par le dispositif de commande  $DC$ . Le signal de commande peut être formé en tenant compte de seulement signal d'action  $U_a$  ou  $U_a$  et les signaux entrant d'autres éléments du commande électrique, par exemple, l'organe de travail  $U_{OT}$ .

Dans le cas où la gestion est effectuée uniquement en tenant compte de signal d'action  $U_a$ , le circuit de commande est ouvert. S'il y a des liens du contrôle des paramètres de l'organe de travail, le circuit de commande est fermé et on a la **commande électrique automatisée**. Les liens assurant l'entrée des signaux sur dispositif de commande à partir d'autres éléments sont appelés des **rétroactions**.

Puisque les processus de fabrication de la production moderne sont complexes, et les exigences à la discipline technologique augmentent constamment, apparaît la nécessité de la large utilisation des réussites de la science moderne et la technique à la création des dispositifs de commande. À l'heure actuelle on applique largement les dispositifs à semi-conducteurs, les ordinateurs de commande, les systèmes à microprocesseurs.

Les entraînements électriques, en fonction de leur conception, sont divisées en classes. Chaque classe comprend les commandes électriques qui possèdent

n'importe quel signe commun, par exemple la classification en fonction du moteur appliqué, du type de convertisseur de puissance ou du type de mouvement, etc.

Considérons, en quelles **classes** on subdivise les entraînements électriques **selon les types de régulation**.

On appelle les **entraînements non réglables électriques** qui mettent en marche les mécanismes ouvriers à la même vitesse, i.e. assurant les opérations les plus simples (la mise en marche, l'arrêt, parfois l'inversion du moteur). De plus en régime établi la fréquence de la rotation est définie par la caractéristique mécanique naturelle et le couple de la charge statique.

On appelle les **entraînements réglables électriques**, dont la fréquence de rotation du moteur est capable de varier sous l'effet du signal de commande.

On appelle les **entraînements électriques asservie**, qui sont capable d'assurer la transformation automatique de n'importe quel signal d'entrée, qui n'est pas défini à l'avance, dans le mouvement du mécanisme industriel. De plus comme le signal d'entrée peut être l'angle de rotation de quelque arbre d'entrée, à la suite de quoi l'arbre de sortie du mécanisme industriel doit répéter son mouvement.

On appelle les **entraînements électriques programmables**, dont le déplacement linéaire ou rotatoire se réalise selon le programme donné. Le programme représente la succession des trajectoires (ou des lois) les mouvements du mécanisme industriel, reproduit par un entraînement électrique.

On appelle les **entraînements électriques adaptives** les entraînements qui sont capable réaliser le choix automatique du meilleur mode du moteur au moyen du changement de la structure et les paramètres du système de gestion.

En fonction du moyen de la transmission de l'énergie mécanique des moteurs vers l'organe de travail des machines industrielles les entraînements électriques sont divisés en trois classes : l'entraînement commun, à moteur individuel et l'entraînement multimoteur.

**L'entraînement électrique commun** – le commande, dont un moteur entraîne dans un mouvement à l'aide de transmissions un groupe des machines de travail ou d'un groupe d'organes de travail d'une machine.

**L'entraînement électrique à moteur individuel** – le commande, dont le moteur électrique entraîne seulement un organe de travail d'une machine. Dans certains cas, le moteur électrique est intégré de manière constructive dans un mécanisme ainsi que forme avec l'organe de travail l'unité. Comme des exemples des organes de travail électrifiés peuvent servir les machine outils à main (voir la chapitre 18), palan électrique, électrobroche, etc.

**L'entraînement électrique multimoteur** – le commande, dont les organes de travail d'une machine sont entraînées par plusieurs moteurs électriques.

## 14.2 Mécanique d'entraînement électrique

La partie mécanique d'entraînement électrique transmet l'énergie mécanique du moteur électrique à la machine industrielle, où cette énergie se transforme en travail utile. L'exécution constructive de la partie mécanique d'entraînement

peut être très différente, toutefois, elle contient certains éléments avec les fonctions communes pour les différents commandes. Le moteur électrique comme un membre de la partie mécanique de la commande est une source ou un consommateur d'énergie mécanique. Son élément tournant (le rotor ou l'ancre) entre dans la partie mécanique de la commande. Il possède une certaine inertie, peut tourner à une certaine vitesse et développer un couple de mouvement ou de freinage.

L'installation de transmission (*IT*) réalise la transformation de mouvement dans la partie mécanique d'entraînement. À l'aide de *IT* on peut augmenter ou diminuer la vitesse, modifier le déplacement, par exemple, réaliser la conversion d'un mouvement de rotation en un mouvement linéaire, etc. Les installations de transmission ce sont les réducteurs, les transmissions hélicoïdales, par poulie et courroie, les engrenages à crémaillère, un tambour avec le câble, le mécanisme à manivelle, etc. L'installation de transmission est caractérisée par le coefficient de transmission (une relation de la vitesse à la sortie vers la vitesse d'entrée), l'inertie mécanique et l'élasticité de ses éléments, le jeu et le frottement dans les engrenages d'installation.

L'organe de travail d'une machine industrielle réalise l'énergie mécanique amenée à lui au travail utile. Le plus souvent il est le consommateur d'énergie. Cette fonction de l'organe de travail est caractéristique des mécanismes, réalisant le traitement des matériaux, de levage ou de déplacement des charges etc. Le flux de puissance mécanique est dirigé du moteur vers l'organe de travail. Parfois, l'organe de travail peut être une source d'énergie mécanique. Dans ce cas, il retourne l'énergie mécanique stockée en mécanisme, par exemple lors de l'abaissement de la charge par une grue. Le flux de la puissance mécanique lors de cela est dirigée de l'organe de travail au moteur. L'organe de travail est caractérisée par une certaine inertie, d'un couple utile lors de son mouvement rotatoire ou d'un effort utile lors de sa translation. Dans chaque mécanisme spécifique il a sa conception constructive. En particulier, sur une grue de levage l'organe de travail c'est le crochet, le grappin des mécanismes de levage, le chariot, le pont des mécanismes de circulation, la plaque tournante de crémaillère. Sur un pont élévateur – c'est une cabine, caisse, skip. Sur un excavateur – c'est un godet des mécanismes de la pression, de traction et de levage des excavateurs à un godet, une roue de rotation des pelles, plaque tournante de crémaillère.

La transmission de l'énergie mécanique de l'arbre du moteur vers l'organe de travail ou à l'inverse est liée aux pertes dans les groupes mécaniques. La raison des pertes – la friction dans les roulements, les guidages, les engrenages etc. Dans les groupes mécaniques possédant l'élasticité, apparaissent les pertes supplémentaires conditionnées par la friction visqueuse dans les éléments déformés. À la suite de cela le flux de la puissance, en passant de la source chez le consommateur, diminue graduellement. Il est évident que les pertes de l'énergie mécanique sont couverts par la source de l'énergie – par le moteur au flux direct de l'énergie et par l'organe de travail à l'inverse.

Le travail, fait par le moteur ou l'organe de travail, est déterminé par les formules :

en cas de mouvement rotatoire

$$W = \int_0^t M\omega dt, \quad (14.1)$$

en cas de mouvement de translation

$$W = \int_0^t Fv dt, \quad (14.2)$$

où :

$F$  – force, N ;

$M$  – couple de force, Nm ;

$\omega$  – vitesse angulaire, rad/s ;

$v$  – vitesse linéaire, m/s.

La puissance mécanique est défini comme la dérivée de travail dans le temps, c'est-à-dire

$$P = \frac{dW}{dt} = M\omega \quad (14.3)$$

pour un mouvement de rotation et

$$P = Fv \quad (14.4)$$

pour un mouvement de translation.

La tâche d'entraînement électrique consiste en l'exécution du mouvement de l'organe de travail, définis par les exigences des lois de la technologie. Souvent, on vient de ce que la loi de mouvement du rotor du moteur est proportionnelle à ladite loi pour l'organe de travail.

Si l'on considère que la partie mécanique d'entraînement se compose des éléments absolument durs, n'est pas déformable et ne contient pas des entrefers, alors mouvement d'un élément donne des informations complètes sur la circulation de tous les autres éléments, c'est-à-dire les dépendances fonctionnelles, correspondant aux lois du mouvement de tous les groupes de la chaîne cinématique d'entraînement, sont proportionnelles l'un à l'autre et de mouvement d'un élément on peut passer selon la relation d'avance connue entre les coordonnées au mouvement de n'importe quel autre élément. Cela permet d'examiner le mouvement d'entraînement sur l'un quelconque élément mécanique. Généralement, comme tel élément on prend l'arbre du moteur, et on lui amène tous les couples ou les forces, ainsi que tous masse d'inertie des groupes mécaniques.

Pour mettre à l'arbre du moteur un couple ou l'effort de la charge de l'organe de travail d'une machine industrielle utiliserons l'équilibre de la puissance dans la partie mécanique d'entraînement

$$P_{\text{moteur}} = P_{\text{ot}} + \Delta P, \quad (14.5)$$

où :

$P_{\text{moteur}}$  est la puissance sur l'arbre du moteur ;

$P_{\text{ot}}$  est la puissance de l'organe de travail ;

$\Delta P$  sont les pertes de puissance dans les éléments mécaniques.

Si pour la partie mécanique d'entraînement est connu le rendement  $\eta$ , l'égalité (14.5) peut être représenté sous la forme

$$P_{\text{moteur}} = P_{\text{ot}}/\eta. \quad (14.6)$$

Dans le cas d'un mouvement de rotation la puissance sur l'organe de travail et sur l'arbre du moteur électrique sont définis comme il suit

$$P_{ot} = M_{ot} \cdot \omega_{ot}, \quad P_{moteur} = M_{st} \cdot \omega,$$

où :

$\omega_{po}$  est la vitesse angulaire de l'organe de travail ;

$M_{ot}$  est le couple de charge sur l'organe de travail ;

$\omega$  est la vitesse angulaire de l'arbre du moteur ;

$M_{st}$  est le couple résistant sur l'arbre du moteur, aussi appelé le couple statique.

Alors

$$M_{st} \cdot \omega = M_{ot} \cdot \omega_{ot} / \eta ,$$

$$\text{ou} \quad M_{st} = \frac{M_{ot}}{i_r \cdot \omega} , \quad (14.7)$$

où  $i_{\text{réd}} = \omega / \omega_{ot}$  est le rapport de transmission du réducteur.

Les rapports ressemblants peuvent être reçus pour le cas du mouvement de translation de l'organe de travail. La puissance sur l'organe de travail

$$P_{ot} = F_{ot} v_{ot}, \quad (14.8)$$

où :

$F_{ot}$  est la force de la charge sur l'organe de travail ;

$v_{ot}$  est la vitesse linéaire de l'organe de travail.

Alors

$$M_{st} \cdot \omega = F_{ot} \cdot v_{ot} / \eta ,$$

$$\text{ou} \quad M_{st} = F_{ot} \cdot \rho / \eta, \quad (14.9)$$

où  $\rho = v / \omega$  est le rayon de réduction des efforts de la charge à l'arbre du moteur.

La valeur  $M_{st}$ , qui est définie par le rapport (14.9), est appelée le ***couple résistant*** (ou le ***couple statique***), ***réduit à l'arbre du moteur***. On détermine les valeurs  $i_r$  et  $\rho$  par paramètres constructive des installations de transmission.

Le sens de la réduction des masses d'inertie et des moments d'inertie des groupes mécaniques à l'arbre du moteur consiste en ce qu'on remplace ces masses et ces couples d'inertie par un moment d'inertie équivalent  $J$  sur l'arbre du moteur. En ce cas la condition de la réduction est l'égalité de l'énergie cinétique, définie par le moment d'inertie équivalent, à la somme des énergies cinétiques de tous les éléments mobiles de la partie mécanique d'entraînement.

Le moment d'inertie équivalent  $J$ , réduit à l'arbre du moteur, est appelé le ***moment résultant (ou totale) d'inertie d'entraînement électrique***.

Des exemples des éléments rotatifs dans la partie mécaniques d'entraînement peuvent servir, à l'exception des rotors de moteurs, les manchons de liaison, les poulies de freinage, les tambours, les plate-formes tournantes des excavateurs et des grues. Les éléments, dont le mouvement est de translation, sont les ponts, les chariots et les charges soulevées par des grues; les charges de convoyeurs, etc.

### 14.3 Équation du mouvement d'entraînement électrique

Lors de l'étude du mouvement d'entraînement électrique apparaît la nécessité de la définition de différentes grandeurs mécaniques – du chemin et de l'angle de rotation, de la vitesse et d'accélération, ainsi que les couples et les forces provoquant le mouvement et définissant son caractère.

Le mouvement d'entraînement électrique est déterminée par l'action de deux couples : le couple du moteur et le couple résistant. En fonction de la cause, conditionnant l'apparition du couple résistant, on distingue les couples résistant réactifs et actifs.

*Un couple résistant réactif* apparaît seulement en conséquence du mouvement. C'est une réaction résistante du groupe mécanique au mouvement. Par exemple, les couples de la friction, apparaissant dans les éléments tournant, les couples sur un rouet des pompes centrifuges, etc. Le couple réactif est toujours dirigé contre le mouvement, i.e. a le signe opposé au signe de la vitesse. L'élément, créant le couple réactif, peut être seulement le consommateur de l'énergie.

*Un couple résistant actif* apparaît indépendamment du mouvement d'entraînement et est créé par les sources étrangères d'énergie mécanique. C'est, par exemple, le couple conditionné par le poids déplacé verticalement de la charge, le couple créé par la force du vent. La direction du couple actif ne dépend pas du sens de rotation, c'est-à-dire le signe du couple actif n'est pas lié au signe de la vitesse angulaire. Au changement de la direction de la rotation le signe de ce couple se garde. La source qui crée un couple actif, peut consommer, ainsi que rendre l'énergie.

Dans les systèmes d'entraînement électrique le principal mode de fonctionnement de la machine électrique est le mode d'un moteur. En ce cas le couple résistant a la nature de freinage par rapport au mouvement du rotor et agit à la rencontre du couple de moteur. Par conséquent, on prend le sens positif du couple résistant à l'opposé du sens positif du couple moteur et l'équation de mouvement d'entraînement électrique a vue

$$M - M_{st} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (14.10)$$

Dans l'équation (14.10) les couples sont les valeurs algébriques, et non pas vectorielles, puisque les deux couples  $M$  et  $M_{st}$  agissent en ce qui concerne le même axe de rotation.

La partie droite de l'équation (14.10) est appelée *couple dynamique* ( $M_{dyn}$ ), c'est-à-dire

$$M_{dyn} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (14.11)$$

où le *moment d'inertie*  $J$  est défini comme

$$J = \int_m r^2 m, \quad (14.12)$$

où :

$r$  est la distance de l'axe de symétrie (le rayon de rotation) ;

$m$  est la masse de corps.

À partir de l'équation (14.11), il ressort que lorsque  $M = M_{st}$  la vitesse de rotation d'entraînement sera invariable ( $\omega = \text{const}$ ) et pas de couple dynamique puisque  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . Cette **mode** de fonctionnement est appelée **stable**.

En cas  $M > M_{st}$ , on a  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , ce qui correspond à l'accélération du moteur. Le couple dynamique dans ce cas, est dirigé à l'opposé au couple du moteur, en limitant l'accélération. Si  $M < M_{st}$ , alors  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  et le moteur ralentit. Le couple dynamique agit dans ce cas conformément avec le couple du moteur.

Le **mode de fonctionnement** d'entraînement électrique lors de la modification de la vitesse de rotation ( $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ ) est appelée **transitoire**. Ce régime a lieu lors du démarrage, de freinage, du changement de la charge, la gestion de la vitesse, etc.

La durée du mode transitoire dépend du moment d'inertie des masses en mouvement. En vertu de l'équation du mouvement (14.11) on peut résoudre une importante tâche pratique sur la dépendance de la vitesse du temps en mode de transitoire ou sur le temps du régime transitoire d'entraînement électrique :

$$d\omega = \frac{M - M_{st}}{J} dt, \quad dt = \frac{J}{M - M_{st}} d\omega. \quad (14.13)$$

Cependant pour sa décision il est nécessaire de connaître les dépendances du couple du moteur  $M$  et du couple de la résistance  $M_{st}$  de la vitesse angulaire de l'arbre du moteur  $\omega$ , qui sont définis par la caractéristique mécanique du moteur (voir chapitre 10.7 et 11.9) et la caractéristique mécanique du mécanisme ouvrier, dont le caractère est défini exceptionnellement par les propriétés du mécanisme industriel (voir chapitre 14.4).

Pour le cas du mouvement progressif de l'organe de travail (d'entraînement électrique linéaire) l'équation principale du mouvement a la forme :

$$\pm F \mp F_{st} = F_{din} = m \cdot a, \quad (14.14)$$

où :

$F$  est la force du moteur électrique ;

$F_{st}$  est la force de résistance statique ;

$F_{din}$  est la force dynamique ;

$m$  est la masse des corps en mouvement de translation ;

$a$  est l'accélération.

Dans l'expression (14.14) la force dynamique  $F_{din}$  dépend de la masse  $m$  des pièces mobiles et du degré de changement de la vitesse de leur déplacement, qui s'exprime par l'accélération  $a$ .

## 14.4 Caractéristiques mécaniques des mécanismes industriels et des moteurs électriques

Lors de l'examen du moteur, qui fait actionner un mécanisme industriel, il faut, avant tout, d'identifier la conformité des caractéristiques mécaniques du moteur au caractère du mécanisme industriel.

La dépendance entre la vitesse et le couple de la résistance du mécanisme, réduit à l'arbre du moteur,  $\omega = f(M_{st})$  on appelle la **caractéristique mécanique du mécanisme industriel**.

On subdivise les caractéristiques mécaniques des mécanismes industriels en groupes suivants.

La caractéristique mécanique, dont le couple de la résistance  $M_{st}$  ne dépend pas de la vitesse (la ligne droite 1 sur la figure 14.2). Une telle caractéristique ont, par exemple, les grues de levage, les treuils, les mécanismes des présentations des découpeuses à métaux, les pompes à piston à hauteur invariable du débit, les convoyeurs avec la masse constante du matériel déplacé. On peut porter ici avec l'approche connue tous les mécanismes, dont le couple principal résistant est le couple de frottement, puisque d'habitude dans la limite des vitesses ouvrières le couple de frottement change peu.

La caractéristique mécanique qui augmente linéairement (la ligne droite 2 sur la figure 14.2). Dans ce cas le couple résistant dépend linéairement de la vitesse  $\omega$ , en augmentant avec son augmentation.

La caractéristique mécanique qui est non linéaire (parabolique, courbe 3 de la figure 14.2). Le couple de résistance  $M_{st}$  ici dépend du carré de la vitesse. Les mécanismes, possédant une telle caractéristique, sont appelés parfois mécanismes avec un couple de ventilateurs, car le couple de résistance des ventilateurs dépend du carré de la vitesse. Vers les mécanismes possédant une telle caractéristique mécanique se rapportent aussi les pompes centrifuges, les hélices, les excavateurs, etc.

Comme on l'a déjà mentionné dans le chapitre 10.7, sous la caractéristique mécanique du moteur on considère la dépendance de sa vitesse angulaire du couple tournant, i.e.  $\omega = f(M)$ . Les moteurs électriques sont caractérisés par la réduction de la vitesse de la rotation lors de la croissance du couple de charge. Cependant le degré du changement de la vitesse avec le changement du couple chez différents moteurs est divers et est caractérisé par paramètre qui a reçu le nom la rigidité. La **rigidité de la caractéristique mécanique d'entraînement électrique** est considérée comme la relation de la différence des couples électromagnétiques, développés par l'installation électromotrice, à la différence correspondante des vitesses angulaires d'entraînement. I.e. la rigidité  $\beta$  est définie par le rapport

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (14.15)$$

Généralement dans des zones de travail les caractéristiques mécaniques des moteurs ont une rigidité négative  $\beta < 0$ . Les caractéristiques mécaniques linéaires ont la rigidité constante. En cas des caractéristiques non-linéaires leur rigidité n'est



pas constante et est définie en chaque point comme un dérivé du couple par la vitesse angulaire

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega} . \quad (14.16)$$

La notion de rigidité peut être appliquée aux caractéristiques mécaniques des mécanismes industriels. Ces caractéristiques peuvent être évalués par rigidité

$$\beta_{st} = \frac{\partial M_{st}}{\partial \omega} . \quad (14.17)$$

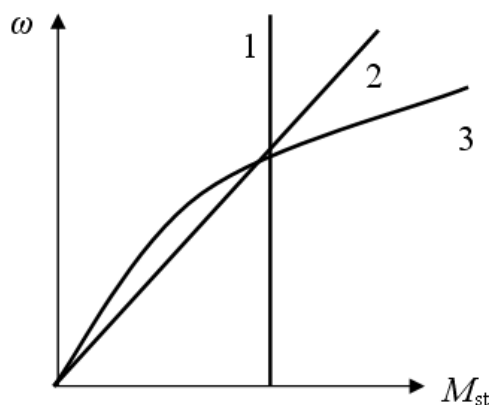
On peut diviser les caractéristiques mécaniques des électromoteurs en quatre catégories principales :

1. La **caractéristique mécanique absolument rigide** ( $\beta = \infty$ ) est une caractéristique, dont la vitesse avec le changement du couple reste invariable. Les moteurs synchrones (la ligne droite 1 sur la figure 14.3) possèdent une telle caractéristique.

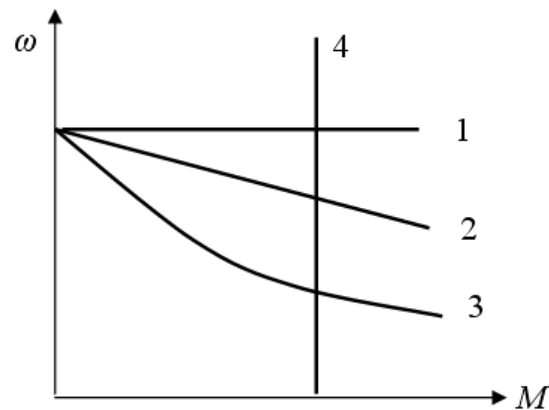
2. La **caractéristique mécanique rigide** est une caractéristique, dont la vitesse avec le changement du couple diminue dans un petit degré. Les moteurs du courant continu de l'excitation indépendante, ainsi que les moteurs asynchrones dans la limite de la zone ouvrière de sa caractéristique mécanique (la courbe 2 sur la figure 14.3) possèdent la caractéristique mécanique rigide.

3. La **caractéristique mécanique non rigide** est une caractéristique à laquelle avec le changement du couple la vitesse change considérablement. Les MCC de l'excitation série, particulièrement dans la zone des petits couples (la courbe 3 sur la figure 14.3) possèdent une telle caractéristique. Pour ces moteurs la rigidité change pour tous les points des caractéristiques.

4. La **caractéristique mécanique absolument non rigide** ( $\beta = 0$ ) est une caractéristique à laquelle le couple du moteur avec le changement de la vitesse angulaire reste invariable. Une telle caractéristique possèdent, par exemple, les moteurs du courant continu de l'excitation indépendante à leur alimentation de la source du courant ou au travail dans les systèmes fermés d'entraînement électrique en régime de la stabilisation du courant de l'ancre (la ligne droite 4 sur la figure 14.3).



**Figure 14.2** – Caractéristique mécanique des mécanismes industriels

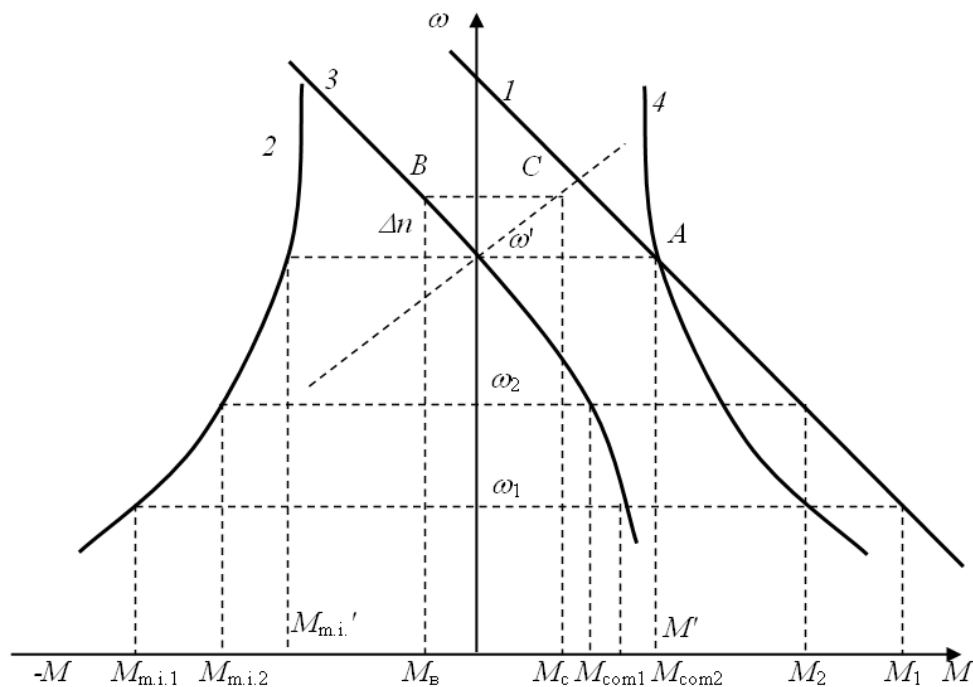


**Figure 14.3** – Caractéristique mécanique des moteurs électriques

Si l'on dispose des caractéristiques mécaniques d'un moteur et d'un mécanisme industriel, il est facile de trouver les points  $(M, \omega)$ , caractérisant le mode stable. Pour cela, il suffit d'empiler graphiquement par le couple deux caractéristiques. La courbe reçue est appelée la **caractéristique commune du moteur et du mécanisme industriel**. Là, où la caractéristique commune croise l'axe de la fréquence de la rotation  $\omega$ , il y aura un point du régime stable en lequel la somme des couples du moteur et du mécanisme est égale à zéro. Donc, conformément à l'expression (14.10) fréquence de la rotation ne changera pas dans le temps.

Sur la figure 14.4 sont présentés à titre d'exemple la caractéristique mécanique du moteur 1 et la caractéristique du mécanisme d'avancement du tour 2. La courbe 3 de caractéristique commune est reçue comme il suit. On prend la fréquence arbitraire de la rotation  $M$  et on définit sans tenir compte du signe les couples créés par le moteur  $M_1$  et le mécanisme industriel  $M_{m.i.1}$ . Puis on définit graphiquement leur différence  $M_{com1}$ . On met le résultat de côté plus grand des couples  $M_1$  et  $M_{m.i.1}$  à la même fréquence de rotation  $\omega_1$ . Puis on répète cette procédure à une autre fréquence de rotation  $\omega_2$  ect. Dans les points reçus on passe la courbe, qui est la caractéristique commune.

Dans l'exemple (fig. 14.4) la caractéristique commune traverse l'axe  $\omega$  en un point  $\omega'$ , i.e. le couple en point avec la fréquence de la rotation  $\omega'$  est égal à zéro. Donc, à cette fréquence de rotation la condition (14.10) est satisfaite et on réalise le régime stable. En utilisant les caractéristiques 1 et 2, il est facile de définir le couple  $M'$ , développé par l'électromoteur, et le couple  $M_{m.i.}$  du mécanisme industriel en ce régime. Dans la pratique les coordonnées du point du régime stable on détermine un peu autrement.



**Figure 14.4** – Caractéristique commune du moteur et du mécanisme industriel

La condition (14.10) est accomplie, si la signification absolue  $M$  est égale à  $M_{m.i.}$ . Donc, si dans la caractéristique mécanique du mécanisme industriel devant

le couple manquer le signe moins, le point du régime stable se trouvera là, où se croiseront cette nouvelle caractéristique (courbe 4 sur la figure 14.4) et caractéristique mécanique du moteur. Graphiquement le passage des couples négatifs de la résistance statique vers les positifs consiste en image de miroir de la courbe 2 en ce qui concerne l'axe  $\omega$  au premier quadrant. Sur la figure 14.4 cette caractéristique est la courbe 4 et, donc, le régime stable se reflète par le point A avec les coordonnées  $M', \omega'$ .

Le fonctionnement d'un moteur électrique et d'un mécanisme industriel dans un régime stable correspond à l'équilibre du couple de résistance d'un mécanisme et du couple de moteur à la vitesse définie, c'est-à-dire  $M = M_{m.i.}$

Le changement du couple résistant sur l'arbre du moteur amène à ce que la vitesse du moteur et le couple, dont il développe, peuvent automatiquement changer, et l'entraînement va continuer à travailler de façon stable à une autre vitesse avec une nouvelle signification du couple. Dans les moteurs électriques le rôle du régulateur automatique peut accomplir la f.é.m. du moteur.

Supposons que  $M = M_1$  et le moteur travaille à la vitesse  $\omega_1$ . Avec l'augmentation de la charge le moteur est freiné, sa vitesse diminue, grâce à quoi diminue la f.é.m. À la réduction de la f.é.m. augmente le courant dans la chaîne d'induit du moteur et le couple développé par le moteur. L'augmentation du couple du moteur se poursuit jusqu'à ce qu'il soit l'équilibre des couples  $M = M_2$ , correspondant à une nouvelle vitesse  $\omega_2$ .

Les conditions examinées du travail d'entraînement électrique en régime stable caractérisent la **stabilité statique d'entraînement**, quand le changement dans le temps de la vitesse et du couple se passe assez lentement à la différence de la stabilité dynamique ayant lieu aux régimes transitoires. La **stabilité statique** – c'est un tel état du régime stable d'entraînement électrique, quand en cas de l'apparition du rejet de la vitesse de la signification stable l'entraînement reviendra au point du régime stable. Au mouvement instable chaque, même le plus petit, écart de vitesse de la signification stable amène au changement de l'état d'entraînement et il ne revient pas au point du régime stable. L'entraînement est statiquement stable, si dans un point du régime stable on satisfait la condition

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_{st}}{d\omega} < 0, \quad (14.18)$$

ou 
$$\beta - \beta_{st} < 0. \quad (14.19)$$

La condition (14.18) signifie que l'entraînemen est statiquement stable, si à l'accroissement positif de la vitesse angulaire le couple du moteur se trouve moins que le couple statique (le couple résistant) et l'entraînemen en conséquence de cela sera freiné jusqu'à l'ancienne valeur de la vitesse. À l'accroissement négatif de la vitesse angulaire le couple du moteur se trouvera plus que le couple résistant, et l'entraînemen en conséquence de cela sera accéléré jusqu'à l'ancienne signification de la vitesse.

Lors du couple de charge constante (ligne 1 sur la figure 14.2) la stabilité statique sera définie seulement par la rigidité de la caractéristique mécanique du

moteur, de sorte que  $\frac{dM_{st}}{d\omega} = 0$ . Si elle est négative, alors le travail dans un état stationnaire est stable  $\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_{st}}{d\omega} = \frac{dM}{d\omega} < 0$ .

Habituellement, lors de la conception d'entraînement électrique la caractéristique mécanique du mécanisme industriel est déjà donnée. Donc, pour obtenir un travail durable dans un régime stable pour les vitesses définies et les couples résistants des mécanismes industriels, il est nécessaire de choisir la caractéristique mécanique de l'électromoteur de la forme correspondante. Cela peut être réalisé par la sélection d'un moteur électrique du type correspondant et par changement des paramètres électriques de ses chaînes.

### 14.5 Choix du moteur électrique

Le choix du moteur lors de la conception d'entraînement électrique est une étape importante. Aucuns des éléments du système de gestion ou des liaisons en retour ne sont pas capables d'assurer les couples demandés, les vitesse et les accélérations nécessaires du mécanisme, si la constitution du moteur, la parti principale d'entraînement, ne crée pas les conditions nécessaires.

Le bon choix du moteur est défini à la fois par les exigences économiques et techniques à ses paramètres. Avant tout, lors du choix on préfère les moteurs les plus simples, bon marché et sûrs – asynchrones et synchrones. Si ces moteurs ne peuvent pas satisfaire aux exigences techniques, on choisit les moteurs à courant continu.

Les exigences, présentées aux paramètres du moteur, sont : la tension nominale correspondant à la tension du réseau ; la puissance, permettant de surmonter les couples résistants aux vitesses et accélérations nécessaires ; capacité de surcharge, assurant le travail d'entraînement aux charges de courte durée ; la plage du changement de la vitesse au réglage, correspondante aux exigences du processus de fabrication, ect.

Le paramètre, le plus essentiel pour le choix du moteur, est la puissance. Le moteur est considéré comme correctement choisi de puissance, s'il exerce les fonctions demandées et ne surchauffe pas. Nous examinerons le sens physique du choix du moteur par la puissance.

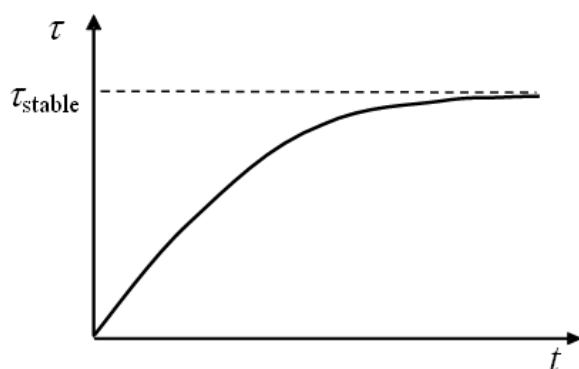
La partie essentielle de la conception de n'importe quelle machine électrique sont les matériaux d'isolation, qui possèdent des propriétés physico-chimiques, permettant d'isoler les conducteurs de bobinages les uns des autres. Si les matériaux d'isolation perdent leurs propriétés, se passent les court-circuits de parcelles individuelles des enroulements, et la machine tombe en panne. Les matériaux d'isolation perdent leurs propriétés diélectriques, si la température est supérieure à la température extrême. *La capacité des matériaux à conserver ses propriétés lors de la température est appelé **résistance à la chaleur**.*

Si au cours du fonctionnement d'un moteur avec l'isolation de la classe correspondante de la résistance à la chaleur la température de son chauffage est inférieure (ou égale) à la température extrême de cette classe, le moteur travaillera

dans les conditions normales. Si la température du moteur sera supérieure à la température extrême, isolation commence à perdre de ses propriétés diélectriques et de tomber en panne.

Après la connexion d'une machine au réseau électrique par ses bobinages passe le courant, l'acier se remagnétise et il y a des autres procès physiques, dans le résultat duquel la partie de l'énergie électrique et mécanique appelée comme les pertes  $\Delta P$ , sera transformée en l'énergie thermique. Une certaine quantité d'énergie thermique se donne à l'environnement, et le reste se dépense sur le chauffage du moteur.

Au premier moment du temps après la connexion à la source d'alimentation le moteur se chauffe d'une manière intense, puis ce procès est ralenti. Enfin arrive la période, quand le changement de la température du moteur pratiquement ne se passe pas (voir la figure 14.5).



**Figure 14.5** – Caractéristique de chauffage du moteur

Il faut remarquer que quand il s'agit de chauffage ou de refroidissement des machines électriques, d'habitude au lieu de la température réelle on se serve de la valeur relative, soi-disant un *excès de la température  $\tau$* , présentant la différence des températures de la machine et de l'environnement.

Avec un peu de l'admission la caractéristique de chauffage d'une machine électrique a la vue de l'exponentielle. Comme on le voit de

la figure 14.5, avec le temps l'excès de température  $\tau$  aspire à la signification maximale  $\tau = \tau_{\text{stable}}$ .

Une machine électrique ne surchauffe pas pendant une longue période, si la valeur stationnaire de l'excès de température  $\tau_{\text{stable}}$  est inférieur (ou égal) à la valeur admissible  $\tau_{\text{adm}}$  de la classe d'isolation de machine :  $\tau_{\text{stable}} \leq \tau_{\text{adm}}$ .

Jusqu'ici nous avons examiné le cas, quand le couple de charge, et donc de la puissance développée par le moteur ne changeait pas dans le temps. Si ces valeurs d'augmenter, ainsi augmentera l'excès stationnaire de température du moteur, de sorte qu'augmenteront les courants qui passent par les enroulements, par conséquent, donc, augmenteront les pertes.

Dans les cas où le couple de charge dépasse les significations admissibles pour le moteur, augmente la puissance consommée par le moteur, et, à la suite de l'augmentation des pertes dans le moteur  $\tau_{\text{stable}}$  peut-être plus que  $\tau_{\text{adm}}$  et le moteur commence à surchauffer. La limite de l'augmentation de la charge est la puissance nominale du moteur, c'est-à-dire si le moteur développait une puissance n'excédant pas la valeur nominale, le fabricant garantirait son fonctionnement normal sans surchauffe.

En chargeant le moteur on peut s'orienter aussi sur le courant nominal et le couple nominal du moteur. Le courant et le couple du moteur ne doivent pas dépasser la valeur nominale. C'est juste si la température ambiante correspond à

40°C. Notamment à telle température de l'environnement on s'oriente lors de calculs thermiques du moteur dans le processus de sa conception.

Lors d'une charge constante pour le choix du moteur il suffit de déterminer la puissance sur l'arbre du mécanisme industriel et de choisir par catalogue un moteur de même puissance nominale ou le plus proche de plus de puissance.

À la charge variable le choix du moteur devient plus compliqué. Dans ce cas on utilise le **diagramme de charge** qui définit la *dépendance graphique du moment résistant du mécanisme industriel du temps*, ainsi que les diagrammes de puissance, des pertes de puissance et du courant du moteur. Le choix du moteur consiste en suivant. La puissance variable d'un mécanisme, connue du diagramme de charge (fig. 14.6), on remplace par une puissance moyenne constante  $P_{\text{moy}}$ , calculée pour le cycle  $t_{\text{cycle}}$  selon la formule

$$P_{\text{moy}} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6} \quad (14.20)$$

Ensuite, on multiplie  $P_{\text{moy}}$  par le coefficient de sécurité  $k_{\text{sécurité}} = 1,14-1,3$ ,  $P'_{\text{moy}} = P_{\text{moy}} \cdot k_{\text{sécurité}}$ . Ensuite selon  $P'_{\text{moy}}$  on choisit un moteur, on fait construire pour lui l'un des diagrammes, et on fait le calcul de contrôle.

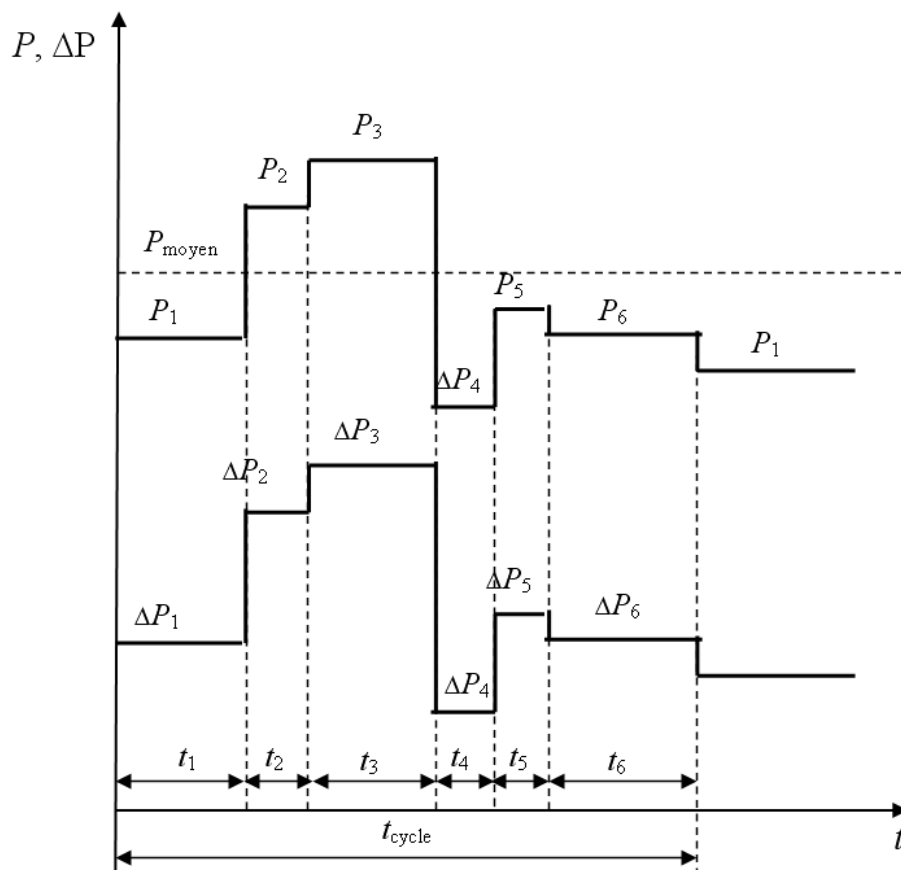


Figure 14.6 – Diagramme de charge d'un moteur

Pour une sélection plus précise du moteur on utilise la **méthode des pertes moyennes**. Pour cette méthode on prend le diagramme de puissance du moteur, qui est différent du diagramme de puissance du mécanisme industriel par l'apparition du couple dynamique lors du changement de la vitesse d'entraînement. En effet,

dans les modes transitoires, la puissance du moteur est dépensée non seulement à surmonter le couple statique résistant, mais aussi le couple dynamique.

Généralement on néglige par cette différence, et pour la méthode des pertes moyennes on utilise le diagramme du mécanisme industriel. Tout d'abord, pour chaque section du diagramme de charge avec une puissance constante à l'aide de caractéristiques de rendement  $\eta(P)$  on définit les pertes du moteur  $\Delta P$ , puis les pertes moyenne pour l'ensemble du diagramme de charge selon l'expression

$$\Delta P_{\text{moy}} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6}, \quad (14.21)$$

où :

$\Delta P_1, \dots, \Delta P_6$  sont les pertes sur les sections 1–6 de diagramme ;

$t_1, \dots, t_6$  sont les temps des sections 1–6 de diagramme (voire la figure 14.6).

Ensuite, on définit les valeurs nominales des pertes  $\Delta P_{\text{nom}}$  par la puissance nominale du moteur et  $\eta_{\text{nom}}$  en mode nominale et on compare les valeurs  $\Delta P_{\text{nom}}$  et  $\Delta P_{\text{moy}}$ . Si  $\Delta P_{\text{nom}} \geq \Delta P_{\text{moy}}$ , on estime que  $\tau_{\text{stable}} \leq \tau_{\text{adm}}$  et que le moteur est choisi correctement. Si  $\Delta P_{\text{nom}} < \Delta P_{\text{moy}}$ , alors il faut choisir par catalogue un moteur de plus grande puissance et refaire le calcul.

On utilise plus largement les méthodes moins exactes, mais plus simples. Ce sont les **méthodes des valeurs équivalentes** : du **courant**, du **couple** et de la **puissance**.

Dans chacune de ces méthodes, on construit pour le moteur pré-sélectionné un diagramme et on détermine par ce diagramme la valeur équivalente du courant (de la couple ou de la puissance) par les expressions :

$$I_{\text{equiv}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.22)$$

$$M_{\text{equiv}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.23)$$

$$P_{\text{equiv}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (14.24)$$

On compare les significations reçues des valeurs équivalentes avec les valeurs correspondantes nominales. Si la valeur nominale est pas moins que la valeur équivalente, le moteur est choisi correctement par la puissance.

Il est nécessaire de se rappeler qu'un moteur, correctement choisi par la puissance, peut être inapte pour l'utilisation dans d'entraînement, si sa capacité de surcharge n'est pas satisfaisante.

La vérification du moteur par la surcharge admissible dans la méthode du courant équivalent se fait par l'expression

$$I_{\text{max}}/I_{\text{nom}} \leq \lambda_i, \quad (14.25)$$

où :

$I_{\text{max}}$  est la valeur maximale du courant lors de la charge variable ;

$\lambda_i$  est le facteur de surcharge admissible du moteur par le courant (pour les moteurs à

courant continu à usage général  $\lambda_i = 2-2,5$ ; pour les moteurs spéciaux, il peut être plus).

Si la condition (14.25) n'est pas accomplie, il faut choisir dans le catalogue un moteur suivant plus la puissance et le vérifier seulement par la capacité de surcharge.

Au choix du moteur à induction il faut vérifier que son couple maximum soit plus de plus grand couple du diagramme de charge.

Pour les moteurs à courant continu de l'excitation indépendante ou parallèle, ainsi que pour les moteurs asynchrones et synchrones on peut appliquer chacune des méthodes énumérées.

Pour les moteurs à courant continu de l'excitation série et composée sont utiles seulement la méthode des pertes moyennes et la méthode du courant équivalent.

Nous avons examiné le choix du moteur au mode continu, quand la température du moteur a le temps d'atteindre la signification établie. Cependant le moteur peut travailler aussi et en ***régime de courte durée***, quand pour la période de travail il n'a pas le temps de se chauffer jusqu'à la température établie, et au cours de l'arrêt il a le temps de se refroidir jusqu'à la température de l'environnement. En régime de courte durée il faut charger le moteur par la puissance nominale plus haute, pour qu'il soit entièrement utilisé selon le chauffage. La charge maximale on définit à partir de la condition  $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{adm}}$ .

Utiliser des moteurs de la destination générale en régime de courte durée est inapproprié, car ils possèdent une faible capacité de surcharge et nécessitent une puissance surévaluée.

Pour les régimes de courte durée l'industrie produit les moteurs spéciaux avec une *capacité de surcharge augmentée* et l'indication de la durée du travail nominal normalisé (10, 30, 60 et 90 min.). On réalise le choix du moteur de la même façon qu'en régime de longue durée, en utilisant les données nominales correspondant au temps de travail valable. Si le temps de travail se distingue du temps normalisé, les paramètres réels du moteur (la puissance, le courant, le couple) on amène vers le temps normalisé choisi le plus proche.

Il y a encore un mode de fonctionnement du moteur – un ***mode cadencé***, dont les *périodes de travail* ( $t_{\text{tr}}$ ) *alternent avec les pauses* ( $t_{\text{p}}$ ), et dans la période de travail le moteur n'a pas le temps de se chauffer jusqu'à la température permanente, et pendant la pause – se refroidir jusqu'à la température de l'environnement.

Le mode cadencé est caractérisé par une ***durée d'enclenchement relative*** (un ***facteur de marche – FM***), qui est défini comme

$$FM = \frac{t_{\text{tr}}}{t_{\text{tr}} + t_{\text{p}}} \cdot 100\%. \quad (14.26)$$

Pour fonctionner en mode cadencé, ainsi qu'en mode de courte durée, on produit les moteurs spéciaux avec les couples de démarrage augmentés. La durée d'enclenchement relative normalisée de ces moteurs est 15, 25, 40, 60 %.



Il est reconnu que le temps de cycle ne dépasse pas 10 min, dans le cas contraire on compte que le mode est permanent. Dans les catalogues pour les moteurs en mode cadencé on indique leurs caractéristiques nominales pour chaque valeur normalisée (standard) du facteur de marche  $FM_{st}$ .

On fait le choix du moteur de la même façon que pour le mode continu, en utilisant les données nominales pour la valeur correspondante de  $FM_{st}$ . Si la durée d'enclenchement ( $FM$ ) diffère de la valeur standard ( $FM_{st}$ ), on choisit le moteur selon les données nominales correspondant la plus proche  $FM_{st}$ . En ce cas les paramètres réels du moteur (la puissance, le courant, le couple) on réduit au paramètre choisi du  $FM_{st}$ .

## Conclusions principales

1. Les éléments de base d'entraînement électrique sont : un électromoteur, une installation de transmission, un dispositif de commande, un convertisseur et un organe de travail.

2. On réalise la gestion de l'entraînement électrique par l'influence sur le convertisseur et l'électromoteur des signaux de commandes, élaborés par le dispositif de commande.

3. Selon les types de régulation on subdivise les entraînements électriques par groupes : non réglables, réglables, asservies, programmables et adaptifs.

4. La tâche principale de la commande électrique consiste en l'exécution du mouvement de l'organe de travail, définis par les exigences des lois de la technologie.

5. Le mode principal de fonctionnement de la commande électrique est le régime stable.

6. Lors du choix d'un moteur électrique pour l'entraînement il faut que sa caractéristique mécanique correspondait à la caractéristique mécanique du mécanisme industriel.

7. On distingue quatre catégories des caractéristiques mécaniques des moteurs : absolument rigides, rigides, non rigides et absolument non rigides.

8. L'entraînement électrique est considéré comme statiquement stable, quand lors d'une augmentation ou d'une réduction de la vitesse angulaire le couple du moteur a une valeur qui conduit à la restauration de l'ancienne valeur de la vitesse angulaire. Le travail d'entraînement dans un état stationnaire est stable, si la rigidité de caractéristique mécanique du moteur est négative.

9. On fait le choix du moteur pour l'entraînement électrique par sa puissance et par sa résistance à la chaleur.

10. En fonction de la nature de changement de chauffage du moteur lors de sa fonctionnement on distingue le mode de courte durée, cadencé et permanent.

## Questions pour la maîtrise de soi

1. Formulez la définition d'entraînement électrique. Quelles sont ses principaux éléments ?
2. Comment on classe les systèmes d'entraînement électrique ?
3. Qu'est-ce que le couple statique ? De quoi il dépend ?
4. Caractérisez les notions « le moment d'inertie équivalent » et « le couple dynamique ».
5. Quel est le sens de la réduction des couples d'inertie à un axe du moteur ?
6. Comment s'inscrit-on l'équation du mouvement d'entraînement électrique ?
7. De quoi dépendent les modes de fonctionnement d'entraînement électrique ?
8. De quoi dépendent le temps du mode transitoire d'entraînement électrique ?
9. Expliquez la notion « la rigidité de la caractéristique mécanique ». Comment on classe les caractéristiques mécaniques par rigidité ?
10. Donnez la définition de la stabilité statique d'entraînement électrique.
11. Quelles sont les causes de la chauffe du moteur électrique ?
12. Quels sont les modes possibles de fonctionnement des moteurs électriques ? Quelles sont les conditions du choix de leur puissance ?
13. Comment on choisit la puissance du moteur pour le mode de longue durée à charge constante ?
14. Dans quel cas le mode du moteur est considéré comme le mode de longue durée ?
15. Quel mode est appelé cadencé ? Comment on détermine la durée d'enclenchement relative ?
16. Comment on choisit la puissance du moteur pour le mode cadencé ?

## Chapitre 15 : REGULATION DE VITESSE D'ENTRAÎNEMENT ÉLECTRIQUE

**Notions clés :** régulation de vitesse,  $f$ ; plage (gamme) de réglage,  $f$ ; finesse de réglage,  $f$ ; rentabilité de régulation,  $f$ ; stabilité de la vitesse,  $f$ ; direction de régulation,  $f$ ; charge maximale admissible du moteur,  $f$ ; rapport période-durée d'impulsions de commande.

### 15.1 Paramètres principaux de la régulation de vitesse angulaire d'entraînement électrique

À l'industrie on utilise un grand nombre des mécanismes industriels travaillant à des différentes vitesses variables. En particulier, dans les ascenseurs, les appareils de levage et de transport il est nécessaire de réduire la vitesse dans la mesure de l'approche du point de l'arrêt pour assurer le ralentissement souple et l'arrêt exact dans une place nécessaire. La vitesse, à laquelle doit travailler extracteur de chaudière, est définie par la qualité du combustible, son humidité, teneur en cendres, les conditions du processus de la combustion et la productivité demandée de la chaudière. Dans tous ces mécanismes, comme dans beaucoup d'autres, pour atteindre la haute productivité et la qualité du travail il est nécessaire de réaliser le réglage de la vitesse.

**Régulation de vitesse** – c'est le changement forcé de la vitesse d'entraînement électrique en fonction des exigences du processus de fabrication. Réglage de la vitesse se réalise par l'influence dirigeant sur le moteur d'entraînement. Les indicateurs principaux, caractérisant des différents modes du réglage de la vitesse de commandes électriques, sont les suivants : plage de réglage ; finesse de réglage ; rentabilité de régulation ; stabilité de la vitesse ; direction de réglage de vitesse (réduction ou augmentation de la vitesse de base) ; charge admissible aux différentes vitesses.

La **plage de régulation de vitesse angulaire** est une relation des vitesses possibles établies : de maximale  $\omega_{\max}$  à minimale  $\omega_{\min}$  à l'exactitude donnée du réglage (avec la chute donnée statique de la vitesse d'entraînement) pour des limites établies du changement du couple de charge et d'autres perturbations.

$$D = \omega_{\max} : \omega_{\min} . \quad (15.1)$$

En général, la plage de réglage est exprimée dans les nombres en forme de la relation, par exemple : 2:1, 4:1, 10:1, 20:1 et ainsi de suite.

La **finesse de réglage** caractérise le saut de la vitesse lors du passage de la vitesse donnée vers la vitesse la plus proche possible. La finesse est plus élevée que plus moins est ce saut. Le nombre des vitesses, reçues dans la gamme donnée, est défini par la finesse de réglage. On peut l'estimer par le **coefficient de la finesse de régulation**, qui est défini comme la relation de deux significations voisines des vitesses angulaires en cas de réglage de la vitesse

$$\varphi_{\text{fin}} = \omega_i / \omega_{i-1} \quad (15.2)$$

où  $\omega_i$  et  $\omega_{i-1}$  sont les vitesses angulaires, respectivement sur les marches  $i$ -ème et  $(i-1)$ -ème du réglage.

Lors du réglage en douceur  $\varphi_{\text{fin}} \rightarrow 1$ , et le nombre des vitesses  $z \rightarrow \infty$ . Le nombre des vitesses  $z$ , la plage de réglage  $D$  et le coefficient de la finesse de réglage  $\varphi_{\text{fin}}$  sont liés entre eux par l'égalité

$$D = \varphi_{\text{fin}}^{z-1}. \quad (15.3)$$

La **rentabilité de réglage** est caractérisé par les dépenses pour fabrication et d'exploitation d'entraînement. Il faut noter que rentable sera un tel entraînement réglé qui assure une plus grande productivité du mécanisme entraîné avec une haute qualité du processus de fabrication et qui est justifié relativement vite. Lors de l'estimation des qualités économiques d'entraînement électrique réglable on prend également en considération la fiabilité et la perte d'énergie dans le processus de réglage.

La **stabilité de la vitesse angulaire** se caractérise par un changement de la vitesse angulaire au rejet donné du moment de la charge et dépend de la rigidité de la caractéristique mécanique. Plus grande est la rigidité de la caractéristique, plus haut est la stabilité de la vitesse angulaire.

La **direction de la régulation de vitesse** c'est la diminution ou l'augmentation de la vitesse par rapport à sa valeur naturelle. On distingue la régulation dans une zone en bas de la vitesse principale, dans une zone en haut de la vitesse principale et dans deux zones, quand on peut obtenir les caractéristiques ci-dessus et ci-dessous de la caractéristique naturelle.

La **charge admissible du moteur** c'est la plus grande valeur du couple que le moteur est capable de développer en continu lors du travail sur les caractéristiques de réglage. Elle est définie par le chauffage du moteur et pour différents moyens du réglage est différente. Le changement du couple de charge en fonction de la vitesse à différents mécanismes de fabrication est également différent. Par exemple, la plupart des mécanismes nécessitent une régulation lors du couple constant. Il s'agit notamment de : grues de levage, treuils, certains laminoirs, etc. D'autre part, il existe des mécanismes dont la régulation de vitesse est fabriqué avec une puissance constante.

Principalement, par la voie du choix de la puissance correspondante du moteur, on peut satisfaire à n'importe quel changement de couple de charge ou de la puissance au réglage de la vitesse. Cependant, la régulation de la vitesse angulaire du moteur peut s'avérer non rentable, puisqu'il sera utilisé inégalement sur les différentes vitesses angulaires et sur certains d'entre eux se trouvera chargé incomplètement. Le chargement incomplet du moteur conduit à l'aggravation des paramètres d'exploitation de l'entraînement, puisque diminue le rendement du moteur, et, en cas du courant alternatif, en outre, diminue le facteur de puissance. Par conséquent, *il est désirable d'appliquer un tel mode de régulation où le moteur serait par possibilité entièrement chargée à toutes les vitesses angulaires.*

Dans la section suivante nous examinerons les moyens principaux du réglage de la vitesse angulaire à l'exemple du moteur à courant continu à l'excitation indépendante, qui a reçu la plus grande application dans l'industrie de la construction.

## 15.2 Régulation de vitesse angulaire du moteur à courant continu à l'excitation indépendante

La vitesse angulaire du MCC à l'excitation indépendante est définie par l'expression

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (15.4)$$

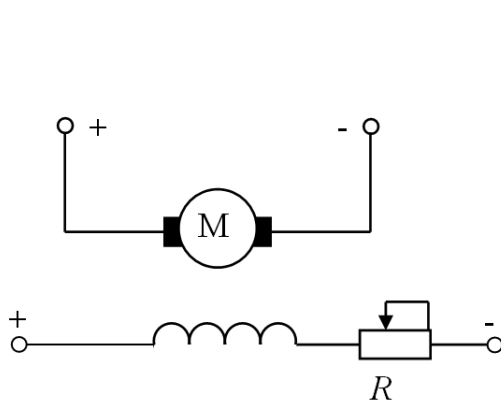
De la relation (15.4) il vient qu'on peut régler la vitesse du MCC à l'excitation indépendante par trois moyens suivants :

- 1) par variation du courant inducteur  $I$  (flux de force magnétique  $\Phi$ ) du moteur ;
- 2) par variation de la résistance de la chaîne de l'ancre  $R$  au moyen des rhéostats (régulation rhéostatique) ;
- 3) par variation de la tension  $U$ , connectée à l'ancre du moteur.

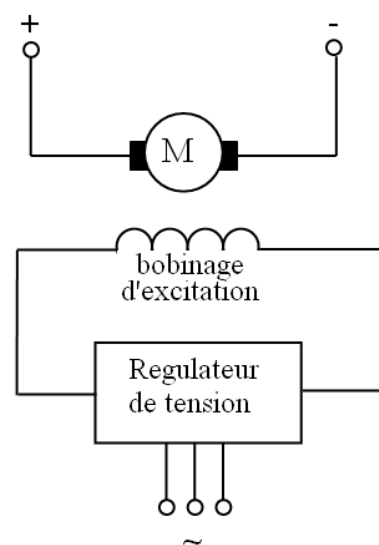
**15.2.1 Régulation de vitesse par variation du courant inducteur** (ou le flux de force magnétique  $\Phi$ , qui est défini par le courant inducteur) est un des moyens les plus simples et économes, puisque la puissance, consommée par le bobinage de l'excitation du moteur, fait près de 2–2,5 % de la puissance du moteur.

En cas des moteurs de faible puissance, on fait réglage du courant inducteur au moyen de la résistance (fig. 15.1) ou du régulateur de tension (fig. 15.2). Dans ce cas le réglage de la vitesse se réalise en haut de la vitesse principale, le couple admissible du moteur change d'après la loi de l'hyperbole et la puissance admissible reste invariable. Puisque la charge admissible est définie par le courant égal à nominal, la puissance, développé par le moteur, est constante ( $P = P_{\text{nom}} = \text{const}$ ). Aux caractéristiques électromécaniques  $\omega = f(I)$  lors du changement du courant inducteur correspondent des différentes valeurs de la vitesse angulaire de la marche à vide idéale, qui peuvent être déterminés par la formule

$$\omega = \frac{U}{k\Phi}. \quad (15.5)$$



**Figure 15.1** – Régulation du courant d'excitation par résistance



**Figure 15.2** – Régulation du courant d'excitation par régulateur de tension

Sur la figure 15.3 sont présentés les caractéristiques électromécaniques du moteur au réglage de vitesse par le flux de l'excitation. La vitesse angulaire de la marche à vide idéale  $\omega_0$  correspond à la caractéristique naturelle, quand le flux  $\Phi = \Phi_{\text{nom}}$ . Les significations des vitesses angulaires de la marche à vide idéale au flux affaibli  $\omega_0'$  et  $\omega_0''$  se situent au-dessus de  $\omega_0$ . Toutes les caractéristiques se croisent avec l'axe des abscisses dans un point. Cela suit de ce qu'à  $\omega = 0$  l'équation pour n'importe quelle caractéristique électromécanique s'écrit ainsi :

$$0 = \frac{U - I \cdot R_{\text{ancr}}}{k\Phi}, \quad (15.6)$$

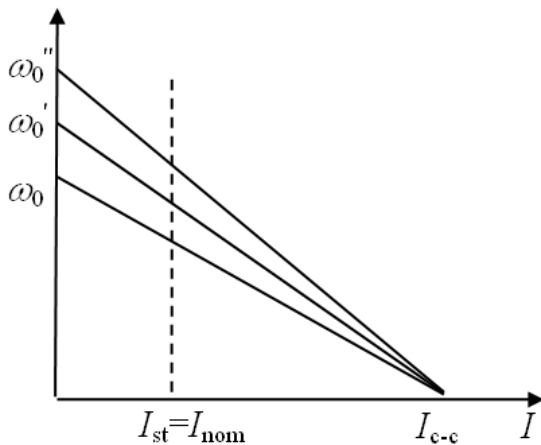
d'où le courant dans l'ancr du moteur sera défini comme il suit

$$I = \frac{U}{R_{\text{ancr}}} = I_{c-c}. \quad (15.7)$$

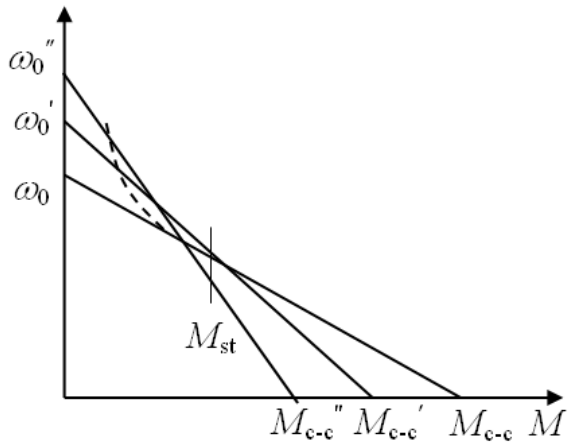
Par conséquent, lors des différents courants d'excitation et lorsque la vitesse angulaire du moteur est égale à zéro, le courant dans la chaîne de l'ancr est égal au courant de court-circuit du moteur. Le point commun d'intersection des caractéristiques électromécaniques est défini par cette valeur de courant.

Les caractéristiques mécaniques (fig. 15.4) ont les mêmes significations des vitesses angulaires de la marche à vide idéale que les caractéristiques électromécaniques. Cependant ces caractéristiques ne se croisent pas dans un point sur l'axe des abscisses, de sorte que pendant la diminution du flux diminue le moment de court-circuit, qui est défini par la formule

$$M_{c-c} = k \cdot I_{c-c} \cdot \Phi. \quad (15.8)$$



**Figure 15.3** – Caractéristiques électromécaniques du MCC à d'excitation séparée



**Figure 15.4** – Caractéristiques mécaniques du MCC à d'excitation séparée

Ce mode de régulation est économique lors de la puissance constante. Les points se trouvant à la ligne du courant nominal  $I_{st} = I_{\text{nom}}$  correspondent à l'utilisation entière du moteur. Ce sont les points situés sur la courbe hyperbolique du couple de la résistance de  $M_{st}$ , comme c'est montré par le pointillé sur la figure 15.4. En ce cas les pertes de la puissance dans la chaîne de l'ancr au travail sur les caractéristiques

régulatrices seront les mêmes, comme sur la caractéristique naturelle, et les pertes sur l'excitation seront moins. Au travail sur les vitesses angulaires correspondant aux points, situés à gauche de la courbe indiquée du couple  $M_{st}$ , le moteur sera chargé incomplètement. Le travail sur les vitesses situés à droite de cette courbe amènera à la surcharge du moteur.

Généralement les moteurs réglables ont la gamme de réglage de 2 : 1 jusqu'à 5 : 1, et dans certains cas jusqu'à (8–10) : 1. La gamme de réglage est limitée par différents facteurs. Le principal d'entre eux est l'aggravation des conditions de la commutation avec l'augmentation de la vitesse angulaire, puisque la f.é.m. réactive provoquant d'étincelage sur le collecteur, est proportionnelle au courant et à la vitesse angulaire, i.e.  $E_R = c \cdot I \cdot \omega$ . En outre, en cas de grandes vitesses angulaires il faut augmenter la solidité mécanique de l'ancre. La limite inférieure de la vitesse angulaire se limite par degré de la saturation de la machine et par chauffage du bobinage d'excitation, i.e. par la vitesse nominale angulaire.

Finesse de réglage dans la limite de la gamme donnée peut être reçue très considérable et est défini par le nombre de degrés du rhéostat régulateur ou le nombre de degrés des installations spéciales réglant la tension, amené au bobinage d'excitation.

Dans la pratique on utilise souvent le réglage d'impulsion paramétrique du courant inducteur, dans lequel il est possible d'obtenir un réglage finesse de la vitesse angulaire dans la gamme (2–3) : 1 et plus (voir chapitre 15.3).

**15.2.2 Régulation rhéostatique de la vitesse du MCC à l'excitation séparée** se réalise par voie du changement de la résistance de la chaîne de l'ancre et ne demande pas des explications spéciales. Dans le chapitre 10 on examinait les caractéristiques rhéostatiques mécaniques du MCC à l'excitation indépendante. En cas de réglage de la vitesse angulaire au moyen des rhéostats dans la chaîne de l'ancre on a les caractéristiques semblables. À la différence du rhéostat de démarrage le rhéostat de régulation doit être calculer conformément au mode de fonctionnement de l'entraînement, il est connecté non seulement de courte durée pendant la mise en marche, mais aussi au temps de travail du moteur avec une vitesse donnée angulaire.

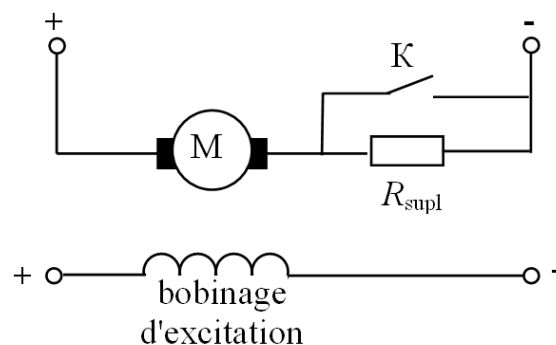
À cette méthode de régulation la rigidité de la caractéristique change et avec elle change la stabilité de la vitesse angulaire. La vitesse angulaire est réglable vers le bas de la vitesse de base, et en outre l'utilisation complète du moteur par courant est obtenue lors de la régulation constante au couple nominal, si le moteur a la ventilation indépendante.

En effet, si l'on considère que pour n'importe quelle vitesse angulaire le courant nominal est valide, c'est-à-dire  $I_{adm} = I_{ancre, nom}$ , et le flux du moteur reste nominal, alors, le couple admissible du moteur est égal au couple nominal  $M_{adm} = k \cdot \Phi_{nom} \cdot I_{ancre, nom} = M_{nom}$ . À mesure de la réduction de la vitesse angulaire la puissance admissible du moteur diminue, de sorte que  $P_{adm} = M_{nom} \cdot \omega$ . Si l'on admet une chute de la vitesse angulaire de 25% lors de la modification du couple de charge de  $\pm 25\%$  du nominale, alors la plage de régulation est d'environ 2 : 1.

Dans la plupart des cas la régulation rhéostatique de vitesse angulaire est produit à l'aide des conjoncteurs fermant les degrés séparés des résistances, i.e. la vitesse d'entraînement change discontinument, par conséquent, cette méthode lors de la gestion par contacteurs n'assure pas le réglage continu.

Un autre moyen de parvenir à la régulation continue lors de l'introduction de résistances dans la chaîne de l'ancré est l'utilisation (au faible puissance du moteur) le réglage d'impulsion paramétrique de la vitesse angulaire.

Le schéma de couplage du MCC à l'excitation indépendante à la régulation de la résistance supplémentaire dans la chaîne de l'ancré est amené sur la figure 15.5. La résistance supplémentaire  $R_{\text{supl}}$ , insérée dans la chaîne de l'ancré, ou est introduite entièrement dans le schéma, ou est renfermé à court-circuit par la clé  $K$ . La commutation de la clé  $K$  se réalise périodiquement. À  $R_{\text{supl}}$  fermé à court-circuit, le courant dans la chaîne de l'ancré et la vitesse angulaire du moteur augmentent, et à la connexion  $R_{\text{supl}}$  dans la chaîne (la clé  $K$  est ouverte) le courant et la vitesse angulaire baissent. Les ondulations du courant et de la vitesse angulaire se produisent environ des certains moyennes. La valeur moyenne du courant est déterminé par le couple de charge sur l'arbre du moteur, et la valeur moyenne de la vitesse angulaire dépend de la relation de durée fermée  $t_1$  et ouverte  $t_2$  des l'états de la clé et du couple de charge.



**Figure 15.5** – Schéma de couplage du MCC à l'excitation indépendante au réglage d'impulsion de la vitesse angulaire

Lorsque les paramètres d'entraînement données, l'amplitude des ondulations du courant et de la vitesse angulaire dépendent de la fréquence de commutation de la clé, qui doit être suffisamment élevé.

Il convient d'exprimer le rapport de durée d'état de la clé  $K$  fermé  $t_1$  et ouvert  $t_2$  sous forme d'une valeur relative

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \quad (15.9)$$

appelé **rapport période-durée d'impulsions de commande**. Il est évident qu'avec l'augmentation  $\varepsilon$  à la charge invariable sur l'arbre du moteur sa vitesse angulaire augmentera, et à  $\varepsilon = 1$  moteur travaillera sur la caractéristique naturelle (la clé  $K$  est fermée constamment). À  $\varepsilon = 0$  moteur travaillera sur la caractéristique rhéostatique correspondant à la résistance  $R_{\text{supl}}$  constamment insérée (la clé  $K$  est ouverte). À d'autres significations  $\varepsilon$  la résistance supplémentaire équivalente (moyenne) dans la chaîne de l'ancré est définie par le rapport



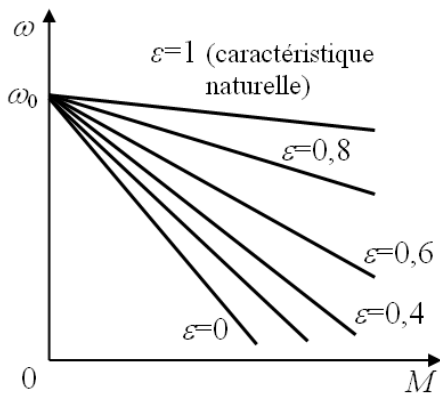
$$R_{\text{supl.équiv}} = R_{\text{supl}}(1 - \varepsilon). \quad (15.10)$$

Les caractéristiques mécaniques du moteur (fig. 15.6), sont définies par la formule (pour les moyennes de la vitesse angulaire et du couple)

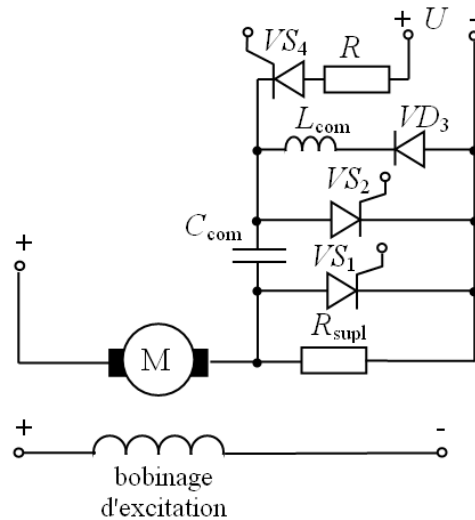
$$\omega_{\text{moy}} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{\text{moy}}}{k\Phi^2} [R_{\text{ancr}} + R_{\text{supl}}(1 - \varepsilon)], \quad (15.11)$$

i.e. les caractéristiques ont la même nature et les mêmes propriétés qu'au réglage rhéostatique de la vitesse angulaire.

Pour la mise en œuvre du mode impulsions de réglage de la résistance (donc et la vitesse angulaire) on applique les clés sans contact sur la base des transistors (au courant jusqu'à 15–20 A) ou des thyristors (au courant de 100 à 150 A). Sur la figure 15.7 est montré le schéma d'une clé à thyristors. Le rôle de la clé accomplit le thyristor *VS1*, qui fait shuntage de la résistance  $R_{\text{supl}}$  lors de l'application de l'impulsion de commande. Le thyristor *VS1* se ferme à l'aide du thyristor d'auxiliaire *VS2*, qui connecte à thyristor *VS1* le condensateur commutant  $C_{\text{com}}$  préalablement chargé par thyristor *VS4* et la résistance  $R$  de la source de faible puissance  $U$ . Le débranchement du thyristor *VS2* se passe à la fin de rechargement du condensateur  $C_{\text{com}}$  de la tension de la chaîne de l'ancre (la chute de potentiel sur  $R_{\text{supl}}$  lorsque le thyristor *VS1* est ouvert). Lors de la suivante l'activation du thyristor *VS1* le recharge inverse du condensateur  $C_{\text{com}}$  se réalise par *VS1*, la diode *VD3* et le réacteur  $L_{\text{com}}$ .



**Figure 15.6** – Caractéristiques du MCC à la régulation d'impulsion de la vitesse



**Figure 15.6** – Schéma de la clé à thyristors

Au réglage de la vitesse angulaire par l'introduction des résistances à la chaîne de l'ancre du MCC les pertes de la puissance dans cette chaîne sont proportionnels à la puissance consommée et à la différence de la vitesse angulaire, exprimée dans les unités relatives.

**15.2.3 Régulation de vitesse par variation de tension sur l'ancre du moteur.** La régulation de vitesse angulaire se réalise en bas de la vitesse de base. Avec la réduction de la vitesse angulaire le couple admissible reste constant, puisque le courant admissible de l'ancre est égal au courant nominal, tandis que le flux à l'excitation indépendante reste invariable (nominal).

Pour de diverses significations de la tension la vitesse angulaire du moteur est égale

$$\omega_1 = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{ancr}}}{k\Phi}; \quad \omega_2 = \frac{U_2 - I \cdot R_{\text{ancr}}}{k\Phi}.$$

Leur relation

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{ancr}}}{U_2 - I \cdot R_{\text{ancr}}}. \quad (15.12)$$

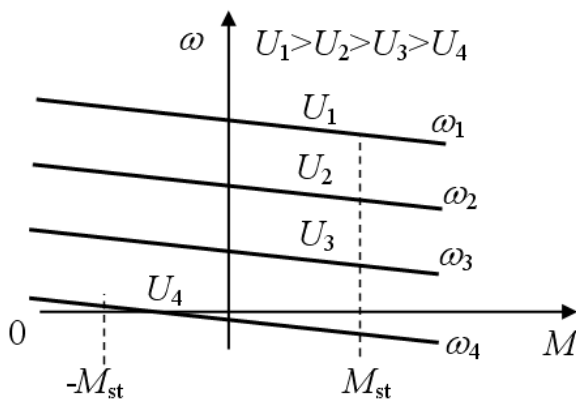
De l'équation (15.12) il suit que lors de la modification de la tension les caractéristiques de réglage sont disposés parallèlement les uns aux autres, c'est-à-dire elles ont la même rigidité (comme le montre la figure 15.8), que définit une assez haute stabilité de la vitesse angulaire. La plage de réglage

$$D = \frac{U_{\text{nom}} - I \cdot R_{\text{ancr}}}{U_{\text{min}} - I \cdot R_{\text{ancr}}}, \quad (15.13)$$

où  $U_{\text{nom}}$  et  $U_{\text{min}}$  sont les tensions nominale et minimale.

De l'équation (15.13) il suit que la différence relative de la vitesse angulaire grandit avec la réduction de la tension. Cela limite la plage du réglage par la signification  $D = (8-10 : 1)$  dans les systèmes d'entraînement sans liaisons en retour (dans les systèmes fermés la plage du réglage est beaucoup plus et peut atteindre des significations 1000 : 1 et plus).

La finesse de réglage est définie par la finesse du changement de la tension d'alimentation et se caractérise d'habitude par la signification du coefficient de la finesse de réglage  $\varphi_{\text{fin}}$ .



**Figure 15.8** – Caractéristique du MCC à la régulation de vitesse par variation de la tension sur l'ancr

Le rendement du moteur est égal dans le cas présent à la relation de la vitesse angulaire réelle du moteur à la vitesse angulaire de la marche à vide idéale sur la caractéristique donnée. Les pertes de la puissance dans la chaîne du ancre lors du couple de la charge constante restent invariables avec réglage de la vitesse angulaire et sont égaux aux pertes lors du travail sur la caractéristique naturelle. Mais puisque la puissance utile dans la mesure de la réduction de la vitesse angulaire

diminue, le rendement du moteur tombe. En conséquence de petites pertes de la puissance dans la chaîne de l'ancr ce mode du réglage de la vitesse est économique.

Du fait que la tension du réseau d'alimentation est maintenue constante, ce mode de régulation est possible lors de l'utilisation appropriée du variateur, dont la tension du courant continue à la sortie est réglable, par exemple, dans le système redresseur commandé – le moteur.

Dans la pratique on applique et d'autres systèmes du changement de la tension sur l'ancre de MCC, parmi lesquels nous citons les redresseurs dirigés à thyristors et les régulateurs d'impulsion de la tension (les convertisseurs d'impulsion en durée). Plus en détail avec ceux-ci on peut faire connaissance dans la littérature spéciale [15, 17].

### 15.3 Régulation de vitesse angulaire des machines asynchrones

L'entraînement électrique par MAS sont largement utilisés dans diverses installations technologiques. Cela s'explique par le fait que les MAS ont une structure simple, un fonctionnement fiable, ils sont moins cher, considérablement plus léger et plus petit par dimensions que les MCC de la même puissance. En outre, certains modes de régulation de la vitesse angulaire ne nécessitent pas des transducteurs de périphériques.

Le plus souvent on règle les MAS triphasé : par changement de la résistance supplémentaire de la chaîne du rotor (la régulation rhéostatique) ; par changement de la tension amené au stator ; par changement commun de la fréquence et de la tension d'alimentation (la fréquence de la méthode) ; par la commutation du nombre des pôles du bobinage du stator du moteur. Pour la régulation de la vitesse angulaire, à l'exception de ceux mentionnés, peuvent être utilisés et les autres moyens: la régulation d'impulsion, la régulation à l'aide de l'embrayage électromagnétique de glissement et al.

#### 15.3.1 Régulation rhéostatique de vitesse des machines asynchrones.

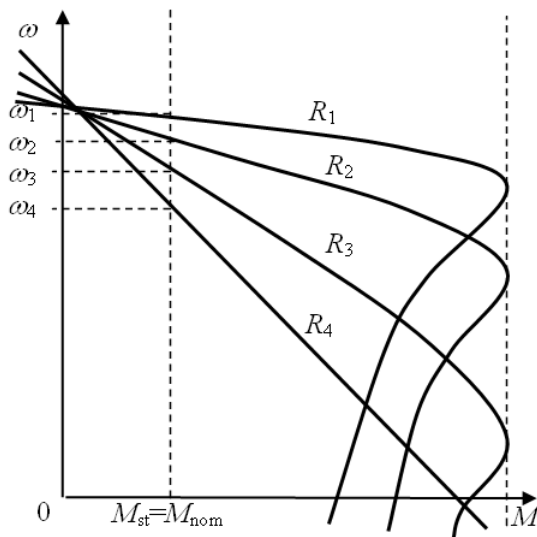
Les caractéristiques mécaniques du moteur à la régulation par l'insertion de la résistance à la chaîne du rotor (la rgulation rhéostatique) sont montrées sur la figure 15.9. D'où on voit que plus la résistance ( $R_1 < R_2 < R_3 < R_4$ ) est connectée à la chaîne de rotor, moins la fréquence de rotation est développée par le moteur au même couple  $M_{st}$ .

Dans la chaîne de rotor passent les grands courants, pour lesquels il est difficile de créer les rhéostats, dont la résistance on peut régler doucement. Donc de manière constructive les résistances, assurant la régulation de rhéostat, accomplissent en gradins et, donc, on fait le réglage de la fréquence de rotation échelonné. Ce moyen a les mêmes faiblesses et mêmes avantages que pour les MCC.

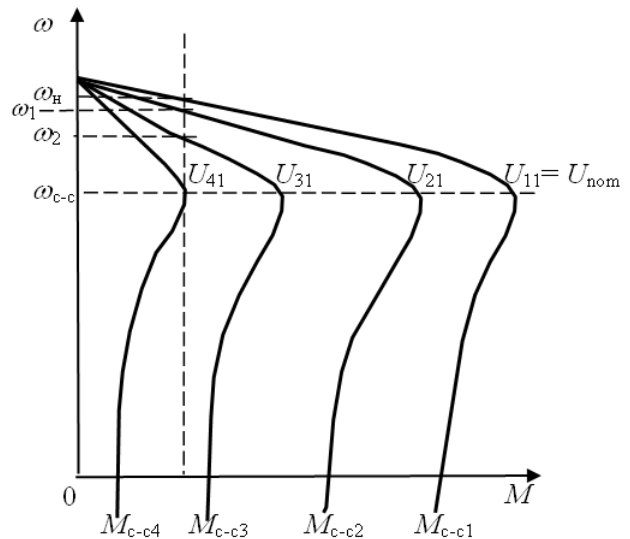
La plage de réglage est instable et dépend de la charge. *La rigidité des caractéristiques baisse considérablement dans la mesure de la réduction de la fréquence de la rotation*, ce qui limite la plage de réglage jusqu'à  $D = (2-3) : 1$ .

La faiblesse essentielle de ce moyen est les pertes considérables de l'énergie, qui sont proportionnelles au glissement :  $\Delta P_2 = P_1 \cdot g$ . Un tel réglage est possible seulement pour les moteurs asynchrones à rotor bobiné.

**15.3.2 Régulation des machines asynchrones par changement de la tension sur le stator du moteur.** Le couple critique  $M_{cr}$  est directement proportionnelle au carré de la tension  $U_1$ , amené au moteur, et  $g_{cr}$  n'en dépend pas. Cela définit la nature des caractéristiques mécaniques correspondant à différentes valeurs de  $U_1$  (fig. 15.10).



**Figure 15.9** – Caractéristiques mécaniques rhéostatiques d’une machine asynchrone

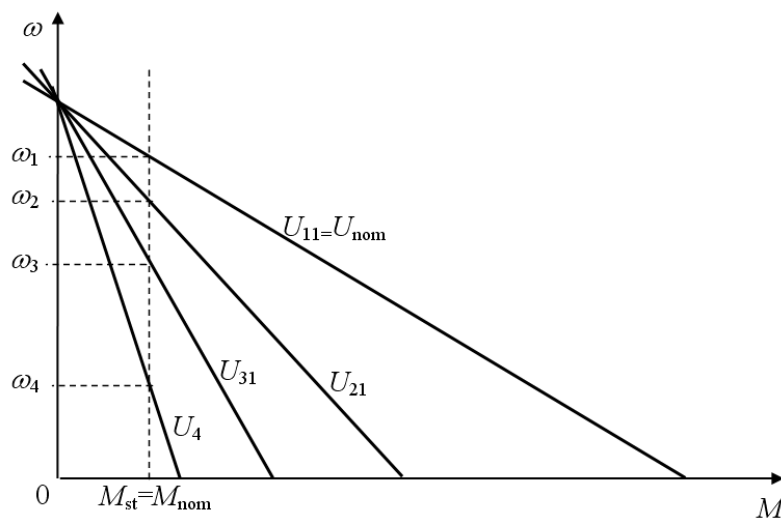


**Figure 15.10** – Caractéristiques mécaniques d’une machine asynchrone lors de changement de la tension du stator

En général, on réalise le réglage par la réduction de la tension. Dans ce cas, comme on voit de la figure 15.10 ( $U_{11} < U_{21} < U_{31} < U_{41}$ ), la fréquence de la rotation (le glissement critique) reste constante, tandis que le couple maximal est réduit proportionnellement au carré de la tension.

Si  $M_{st} > M_{c-c}$ , le moteur ne démarrera pas, c’est pourquoi il est nécessaire de faire tourner le moteur à la tension nominale ou préalablement retirer de son arbre la charge. La plage de réglage est petite (jusqu’à  $\omega_{cr}$ ).

Pour augmenter la plage de régulation on introduise dans le circuit du rotor un résistor non réglable, dont la résistance est suffisante pour obtenir le glissement critique  $g_{cr} = 3-4$ . Une telle régulation (fig. 15.11), à la différence de rhéostatique permet d’assurer la finesse du changement de la fréquence de la rotation et d’exclure l’équipement de contact dans la chaîne de rotor.



**Figure 15.11** – Caractéristiques mécaniques d’une machine asynchrone lors de changement de la tension du stator et l’insertion de la résistance active à la chaîne du rotor

Afin de modifier la tension lors du réglage on utilise les autotransformateurs, les amplificateurs à semi-conducteurs, les régulateurs de tension à thyristors.

**15.3.3 Régulation des machines asynchrones par changement commun de la fréquence et de la tension.** Le plus grand intérêt pratique présente la méthode en fréquence du réglage continu de la fréquence de rotation. Pour la meilleur utilisation de la machine asynchrone au réglage en fréquence il est nécessaire qu'avec le changement de la fréquence changera la tension fournie aux enroulements du stator. La loi du changement de la tension dépend du changement de la fréquence d'alimentation et du caractère de la charge.

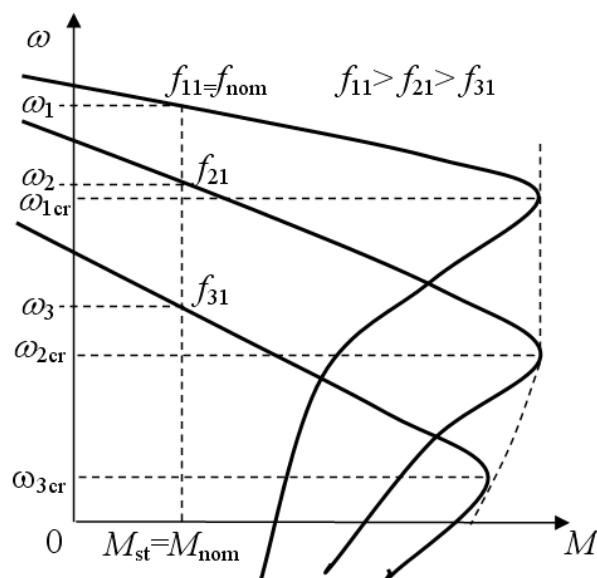
Ainsi, si le couple résistant (couple statique de la charge)  $M_{\text{rés}}$  ne dépend pas de la fréquence de rotation, i.e.  $M_{\text{rés}}(\omega) = \text{const}$ , il est nécessaire au réglage par le changement de la fréquence  $f_1$  ainsi changer la tension  $U_1$ , que

$$U_1 / f_1 = \text{const} . \quad (15.12)$$

Si le couple statique résistant est inversement proportionnel à la fréquence de rotation, de sorte que la puissance de charge  $P_{\text{ch}} = M_{\text{rés}} \cdot \omega$  reste constante, alors le rapport de  $U_1$  et de  $f_1$  doit être :

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const} .$$

Sur la figure 15.12 on amène la famille des caractéristiques mécaniques lors de changement de la fréquence de la tension conformément à l'expression (15.12). Avec la réduction de la fréquence  $f_{11} < f_{21} < f_{31}$  la fréquence critique de la rotation diminue, de plus dans le domaine de hautes et moyennes fréquences le couple critique reste invariable, et dans le domaine de petites fréquences diminue un peu.



**Figure 15.12** – Caractéristiques mécaniques d'une machine asynchrone lors de changement de la fréquence de la tension du stator

La méthode de réglage par fréquence permet d'établir la fréquence de la rotation plus haute et plus basse de la valeur nominale. On est admis (des conditions de la solidité) l'augmentation de la fréquence de la rotation à 1,5–2 fois plus que nominale, et par la réduction à 10–15 fois moins que la valeur nominale. La limite inférieure est limitée par ce qu'est techniquement difficile de recevoir les sources d'alimentation à basse fréquence, ainsi qu'obtenir la rotation assez régulière de l'arbre du moteur. Ainsi, le réglage de fréquence permet de changer la fréquence de la rotation dans la plage jusqu'à  $D = (20-30) : 1$ . La limite inférieure de la fréquence de rotation

peut être diminuée à l'aide des liaisons en retour par la fréquence de la rotation, par le courant et la tension.

La commande par fréquence est un moyen effectif par les paramètres technologiques de la gestion des machines asynchrones. La plage ouvrière de la caractéristique mécanique possède une haute rigidité à n'importe quelle fréquence d'alimentation  $f_1$ . Les pertes de la puissance sont pas grandes, puisque le moteur travaille toujours à de petits glissements; la finesse de réglage peut être pratiquement n'importe quel. On peut réaliser la gestion, en utilisant le moteur le plus simple et sûr avec un rotor à cage d'écureuil.

#### 15.3.4 Régulation de vitesse des machines asynchrones par la commutation du nombre de paires de pôles. À partir d'équation

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p \quad (76)$$

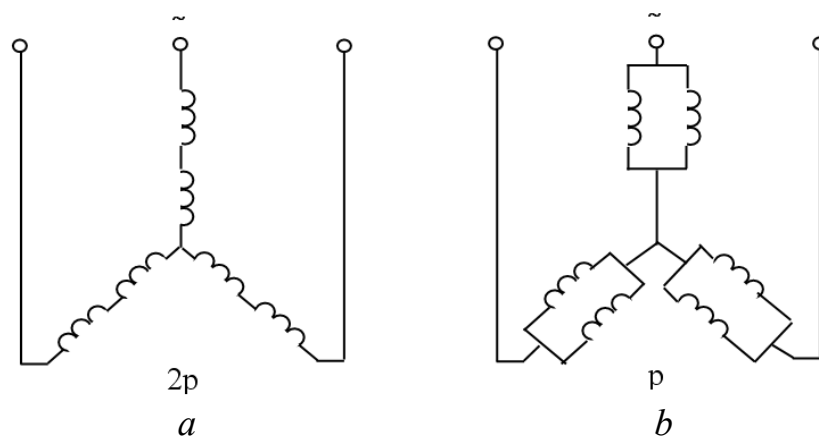
il vienne qu'au changement du nombre de paires de pôles  $p$  on obtienne les caractéristiques mécaniques avec une différente fréquence de rotation de la marche à vide idéale  $\omega_0$ . Puisque la signification de  $p$  est définie par les nombres entiers, alors le passage d'une caractéristique vers l'autre en train du réglage a le caractère en gradins. Il y a *deux moyens du réglage de la vitesse par le changement du nombre de paires de pôles*.

**Le premier moyen.** Dans les rainures du stator sont empilés deux bobinages avec un différent nombre de pôles. En fonction de la fréquence demandée de la rotation on connecte à la source d'alimentation l'un ou l'autre enroulement.

**Le deuxième moyen.** Le bobinage de chaque phase est fait de deux parties, qui sont dans le processus de régulation relient en série ou en parallèle. En ce cas le nombre de paires de pôles change à 2 fois.

L'industrie produit les moteurs spéciaux à plusieurs vitesses, dont la structure prévoit la possibilité du changement du nombre de paires de pôles.

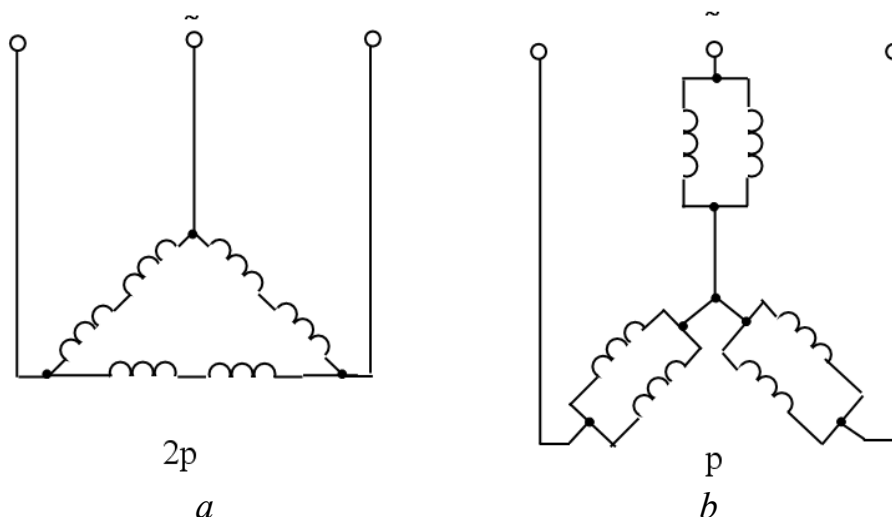
Sur les figures 15.13 et 15.14 on amène les schémas de la commutation de l'étoile simple sur l'étoile double et du triangle sur l'étoile double. On utilise la commutation de l'étoile simple sur double (fig. 15.13) dans le cas où le moment de la charge du mécanisme ouvrier ne dépend pas de la fréquence de rotation (fig. 15.15, a), i.e.  $M_{st}(\omega) = \text{const.}$



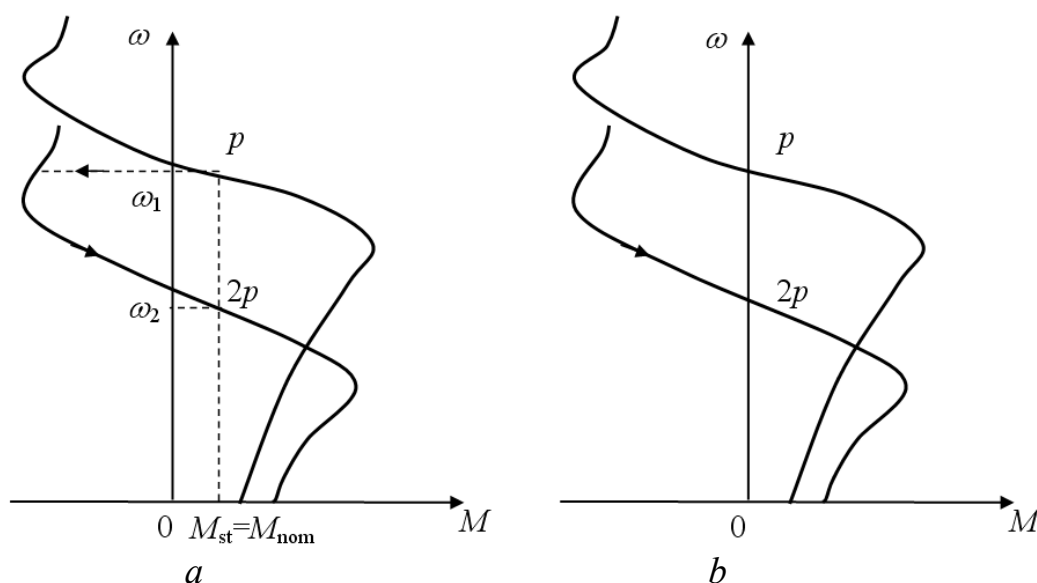
**La figure 15.13** – Schéma de commutation des bobinages du stator de l'étoile simple sur l'étoile double

La **commutation du triangle sur l'étoile double** (voir fig. 15.14) on utilise quand la puissance de la charge du mécanisme ouvrier ne dépend pas de la fréquence de rotation (fig. 15.15, *b*), i.e.  $P_{st}(\omega) = \text{const}$ , et le couple résistant est inversement proportionnelle à la fréquence de rotation.

La trajectoire du passage du point ouvrier du moteur aux commutations du bobinage du stator est montrée sur la figure 15.15, *a* par les lignes pointillées et la ligne totale avec les flèches. Le passage de la fréquence supérieure de la rotation sur la fréquence l'inférieure est accompagné par le travail du moteur en régime générateur avec l'impact de l'énergie au réseau.



**La figure 15.14** – Schéma de commutation des bobinages du stator de triangle sur l'étoile double



**Figure 15.15** – Caractéristiques mécaniques d'une machine asynchrone lors de la commutation de l'étoile simple sur l'étoile double (*a*) et du triangle sur l'étoile double (*b*)

Le **défaut principal** du réglage par le changement du nombre de paires de pôles est la *nature en gradins du changement de la fréquence de la rotation*. En même temps le réglage est économe, a une haute stabilité de la fréquence de

rotation et est utilisé principalement pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Dans les systèmes automatisés cette méthode de réglage est appliquée pour un certain nombre des machine-outils qui permet de diminuer le nombre de transmissions mécaniques dans les boîtes de vitesses.

### **Conclusions principales**

1. La régulation de vitesse c'est le changement forcé de la vitesse d'entraînement électrique en fonction des exigences du processus de fabrication. Elle est réalisée par l'influence dirigeant sur le moteur d'entraînement.

2. Les paramètres principaux, caractérisant la régulation de vitesse des entraînements électriques, sont : la plage de régulation ; la finesse de régulation ; la rentabilité de régulation ; la stabilité de la vitesse ; la direction de régulation ; la charge admissible.

3. La plage de régulation de vitesse angulaire – c'est une relation des vitesses possibles établies : de maximale  $\omega_{\max}$  à minimale  $\omega_{\min}$  à l'exactitude donnée du réglage pour des limites établies du changement du couple de charge et d'autres perturbations.

4. On peut régler la vitesse du MCC à l'excitation indépendante par le changement du courant inducteur, par le changement de la résistance de la chaîne de l'ancre, par le changement de la tension connectée à l'ancre du moteur.

5. La vitesse d'une machine asynchrone on règle par le changement de la résistance supplémentaire de la chaîne du rotor, par le changement de la tension connectée au stator, par le changement commun de la fréquence et de la tension d'alimentation, par la commutation du nombre de pôles du bobinage du stator.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Que comprend-t-on par le réglage de la vitesse d'entraînement électrique ?
2. Expliquez les paramètres principaux de la régulation de vitesse angulaire d'entraînement électrique.
3. Quelles sont les méthodes utilisées pour la régulation de la vitesse angulaire du MCC à excitation séparée ?
4. Dans quelle direction réalise-t-on le réglage de la vitesse du MCC à l'excitation indépendante par changement du courant inducteur ? Expliquez, pourquoi ?
5. Dans quelle plage on règle la vitesse du MCC à l'excitation indépendante au changement du courant inducteur ? De quoi elle est limitée ?



6. Dans quelle direction réalise-t-on le réglage de la vitesse du MCC à l'excitation indépendante par la régulation rhéostatique ? Expliquez, pourquoi ?
7. Dans quelle chaîne on connecte la résistance supplémentaire au réglage de la vitesse par le flux de l'excitation (par la régulation rhéostatique) ?
8. Comment est défini rapport période-durée d'impulsions de commande ? Sur quoi il influence ?
9. Quelle est la nature des caractéristiques régulatrices du MCC à l'excitation indépendante lors de changement de la tension sur l'ancre ?
10. Ce qui limite la plage de la régulation de vitesse d'un MCC à excitation séparée lors de la modification de la tension sur l'ancre ?
11. Quelles méthodes sont utilisées pour le réglage de la vitesse angulaire du moteur à induction ?
12. Par quoi est limité la plage de réglage de la vitesse du moteur à induction lors de réglage rhéostatique ?
13. Par quoi est limité la finesse de réglage de la vitesse du moteur à induction lors de réglage rhéostatique ?
14. Quelles sont les particularités du réglage de la vitesse du moteur à induction par le changement de la tension de stator ?
15. Dans quel but lors de réglage de la vitesse du moteur à induction par le changement de la tension de stator dans la chaîne du rotor on introduit la résistance constante ?

## Sixième partie : INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DES CHANTIERS, DES ENTREPRISES ET DES BATIMENTS

---

### Chapitre 16 : INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DES EQUIPEMENTS DE SOUDAGE

**Notions clés :** soudage,  $m$  ; soudage à l'arc,  $m$  ; soudage automatique,  $m$  ; génératrice de soudage,  $f$  ; appareil de soudage,  $m$  ; soudage par contacts,  $m$ .

#### 16.1 Procédés de soudage électrique

Le soudage c'est un procédé d'obtention de la liaison indivisible des matériaux par chauffage local des bords des pièces soudées jusqu'à l'état plastique ou fondu.

Le soudage électrique a reçu une large application en génie de la construction, puisque les coutures soudées possèdent une haute qualité et une grande solidité. La solidité de la liaison soudée est assurée par les liens atomiques ou moléculaires. De plus, une importante signification a la diffusion mutuelle des atomes des matériaux soudés.

Dans le soudage électrique on utilise le phénomène de l'arc électrique, qui représente la décharge électrique accompagnée par la température élevée et par la densité du courant considérable, qui peut atteindre de quelque mille ampère sur  $1\text{ cm}^2$ . La chute de potentiel sur l'arc est insignifiante (10–20 V).

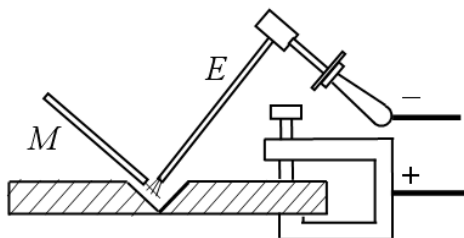
La technique moderne dispose d'une grande variété des procédés de soudage. À présent les plus répandus **deux moyens de soudage électrique : à l'arc et par contacts**.

Le soudage à l'arc, dont la fusion du métal des bords des pièces soudées et d'électrode (ou de métal d'apport) est produite en raison de la chaleur dégagée par l'arc électrique, est accomplie manuel, semi-automatiquement et automatiquement.

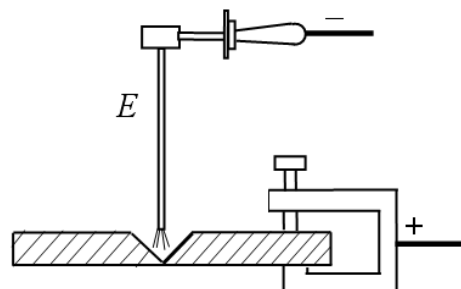
**Le soudage à l'arc manuel** peut être effectué de deux moyens par la méthode de N. Benardos [75] et la méthode de N. Slavyanov [76].

Le soudage par la méthode de l'inventeur russe N. N. Benardos (fig. 16.1) on réalise comme il suit. Le pôle positif de la source du courant continu est connecté aux pièces à assembler, et le pôle négatif – vers l'électrode  $E$ , qui ne fond pas. Entre l'électrode  $E$  (de charbon, de graphite ou de tungstène) et les pièces on provoque l'arc électrique. Les bords des pièces et le métal d'apport  $M$ , introduit dans la zone de l'arc, chauffent jusqu'à la fusion et reçoivent le bain de métal fondu. Après le durcissage de la cuvette se forme un cordonnet. La méthode donnée est utilisé, en général, à la soudure des métaux non-ferreux ou leurs alliages, ainsi qu'à la recharge des alliages fermes.

Le soudage par le méthode de N.G. Slavyanov (fig. 16.2) on accomplit à l'aide de l'électrode fondante. L'arc électrique s'excite entre l'électrode métallique (fondu) et les bords des pièces soudées. On obtient un bain du métal fondu, qui, en se refroidissant, forme un cordon de soudure.



**Figure 16.1** – Soudage par le méthode de N. Benardos



**Figure 16.2** – Soudage par le méthode de N. Slavyanov

Selon le moyen de N. Slavyanov, qui est le plus courant, il est possible d'application du courant alternatif à la condition de la couverture de l'électrode principale par le badigeonnage spécial. Les couvertures des électrodes et les compositions des flux contient la quantité considérable des éléments ayant la température basse de l'ionisation et donc augmentant la stabilité de l'arc électrique.

**Le soudage automatique et semi-automatique** sous flux est effectuée par la mécanisation des principaux mouvements de soudeur – le dépôt de l'électrode le long de son axe dans la zone de l'arc et de son déplacement le long du cordon de soudure.

Lors du soudage semi-automatique le dépôt de l'électrode le long de son axe dans la zone de l'arc est mécanisé et le déplacement de l'électrode le long du cordon de soudure est produit par le soudeur à la main. Lors du soudage automatique toutes les opérations nécessaires au procédé de la soudure sont mécanisés.

Le métal fondu est protégé contre l'influence de l'oxygène et de l'azote de l'air par la fluxion spéciale en grains. La haute productivité et la bonne qualité des cordonnets ont assuré une large application de la soudure automatique et semi-automatique sous flux.

Le soudage électrique par contacts est produite à l'aide de la chaleur générée le courant au passage par les bords de la pièce soudée. En ce cas dans la place du contact des bords se détache la plus grande quantité de la chaleur chauffant les pièces jusqu'à l'état de soudure. La soudure s'achève par le serrage ultérieur des bords soudés.

## 16.2 Exigences principales aux sources d'alimentation de l'arc de soudage

Le soudage à l'arc commence par le court-circuit de la chaîne de soudage – le contact entre l'électrode et la pièce. En ce moment il y a dégagement de chaleur et le réchauffage rapide de la place du contact. Cette phase initiale demande une tension augmentée du courant de soudage.

Dans le soudage à l'arc au passage des gouttes du métal d'électrode au bain de soudure il y a des courts-circuits très fréquents de la chaîne de soudage. Avec cela

la longueur l'arc de soudage change. À chaque court-circuit la tension baisse jusqu'à la signification nulle. Pour la restitution ultérieure de l'arc il est nécessaire d'avoir une tension de l'ordre de 25–30 V. Une telle tension doit être assurée pour le moment pas plus de 0,05 s, pour soutenir la combustion de l'arc à la période entre les courts-circuits.

Il faut prendre en considération qu'aux courts-circuits de la chaîne de soudure les grands courants se développent (les courants du court-circuit), qui peuvent provoquer la surchauffe dans le câblage et les bobinages de la source du courant. Ces conditions du procès de la soudure ont défini les exigences présentées aux sources d'alimentation de l'arc de soudure. Pour la garantie du procédé stable de la soudure les sources d'alimentation de l'arc doivent satisfaire aux exigences suivantes :

1. La tension à vide doit être suffisante pour l'excitation facile de l'arc et en même temps ne doit pas dépasser les normes de sécurité. Pour les génératrices de soudage pour un seul poste la tension à vide ne doit pas être plus de 80 V, et pour les génératrices pour plusieurs postes – pas plus de 60 V. Pour les transformateurs de soudage est établi la plus grande tension admissible 70 V quand l'intensité du courant de soudure est plus que 200 A et la tension 100 V quand l'intensité du courant de soudure est moins que 100 A.

2. La tension d'arc (tension de service) doit s'établir rapidement et varier en fonction de la longueur d'arc, en assurant la combustion stable de l'arc de soudure. Avec l'augmentation de la longueur de l'arc tension devrait rapidement augmenter et avec la réduction – rapidement diminuer. Le temps de restitution de la tension de service de 0 à 30 V après chaque court-circuit (au transfert minuscule du métal de l'électrode vers la pièce à souder) doit être moins de 0,05 s.

3. La valeur du courant de court-circuit ne doit pas dépasser la valeur du courant de soudure plus que sur 40–50 %. De plus, la source du courant doit subir les courts-circuits longs de la chaîne de soudure. Cette condition est nécessaire pour la protection des bobinages de la source du courant contre la surchauffe et des dommages.

4. La puissance de la source du courant doit être suffisante pour l'exécution des travaux de soudage.

En outre, il faut avoir des installations, permettant de régler la signification de l'intensité du courant de soudure dans les limites demandées. L'équipement de soudure doit répondre aux exigences des normes d'État.

### **16.3 Convertisseurs de soudage à courant continu**

On subdivise les convertisseurs de soudage à courant continu en groupes suivants.

*Selon le nombre de postes* : pour un poste à souder, destinés à l'alimentation d'un arc ; pour plusieurs postes à souder, qui alimentent simultanément plusieurs arcs de soudure.

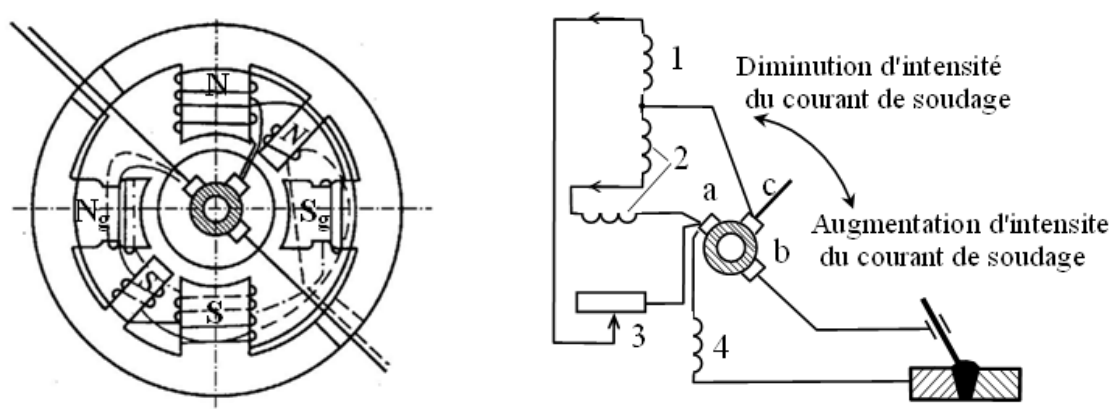
*Selon le moyen de l'installation* : stationnaire, installés immobile sur les fondements ; mobiles, montés sur les chariots.

*Selon la nature de moteurs, amenant le générateur à la rotation :* les machines avec l'entraînement électrique ; les machines avec un moteur à combustion interne (de benzine ou à moteur diesel).

*Selon le moyen de l'exécution :* dans un boîtier, dont le générateur et le moteur sont monté dans un boîtier commun ; séparés, dont le générateur et le moteur sont établi sur une croisée commune, et l'entraînement se réalise dans le manchon spécial de liaison.

Dans la construction on utilise largement les générateurs pour un seul poste à pôles désagrégés, qui travaillent selon le principe de l'utilisation de flux de force magnétique de l'ancre pour avoir une caractéristique externe tombante.

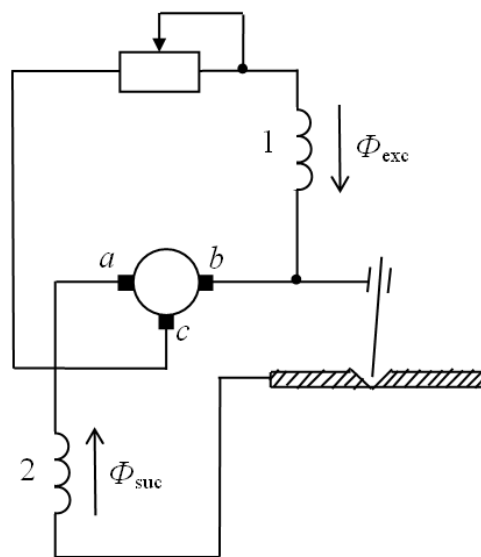
Sur la figure 16.3 on montre le schéma d'un générateur de soudage de ce type. Le générateur a quatre pôles principaux et deux pôles auxiliaires. De plus les pôles principaux homonymes sont situés à proximité en inventant un pôle fourchue.



**Figure 16.3** – Schéma du générateur à pôles désagrégés :  
1, 2 – en conséquence le bobinage réglé et non réglé;  
3 – rhéostat; 4 – bobinage en série; a, b, c – les balais

Les bobinages de l'excitation ont deux sections : non réglé 2 et réglé 1. Le bobinage non réglé est disposé sur tous quatre pôles principaux, et le bobinage réglé est placée seulement sur les pôles transversaux du générateur. Dans la chaîne du bobinage d'excitation réglé est inclus un rhéostat 3. Sur les pôles supplémentaires est disposé un bobinage en série 4. Sur la ligne neutre de symétrie entre les pôles opposés sur le collecteur du générateur se trouvent les balais principaux a et b, à qui on connecte la chaîne de soudure. Le balai supplémentaire c sert pour l'alimentation des bobinages de l'excitation. Le réglage grossier est produit par le déplacement de traverse du balai, sur lequel on dispose toutes trois balais du générateur. Si rapprocher les balais en sens de rotation de l'ancre, l'action désaimantant du flux de l'ancre augmente et la valeur du courant de soudage diminue. En cas rapprochement en sens inverse l'action désaimantant diminue et l'intensité du courant de soudage augmente. Le réglage de l'intensité du courant plus fin et exact on produise par un rhéostat inséré dans la chaîne du bobinage de l'excitation. En augmentant ou en diminuant par le rhéostat l'intensité du courant de l'excitation dans le bobinage des pôles transversaux, on change du flux de force magnétique  $\Phi$  et donc la tension du générateur et la valeur du courant de soudage.

À l'exception des générateurs avec la réaction d'induit démagnétisante on applique les générateurs de soudage, dont la caractéristique externe tombante et la limitation de la valeur de l'intensité du courant de court-circuit est assurée par l'action désaimantant du bobinage successif de l'excitation inséré dans la chaîne de soudure. Le schéma d'un tel générateur est présenté sur la figure 16.4. Le générateur a deux bobinages : un bobinage d'excitation 1 et un bobinage désaimantant 2. Le bobinage d'excitation est alimenté ou des balais principale et supplémentaire, ou d'une source de courant spécial dont la tension est constante. C'est pourquoi le flux de force magnétique  $\Phi_{exc}$ , créé par ce bobinage, est constant et ne dépend pas de la charge du générateur. Le bobinage désaimantant est inséré successivement avec le bobinage de l'ancre ainsi que lors de la combustion de l'arc le courant de soudage, en passant dans le bobinage, crée le flux de force magnétique  $\Phi_{suc}$  dirigé contre le flux  $\Phi_{exc}$ .



**Figure 16.4** – Générateur de soudage avec la réaction d'induit démagnétisante :  
1 – bobinage d'excitation ; 2 – bobinage désaimantant ; a, b, c – les balais

Une large application dans l'industrie de la construction dans les procédés de soudage ont reçu les redresseurs à souder. Ils convertissent le courant alternatif en courant continu à l'aide des redresseurs à sélénium, au germanium ou au silicium.

Les installations de redresseurs ont un plus haut rendement. En outre il faut noter leurs tels importants avantages, comme l'absence des parties tournant, de petites masses, de petits gabarits et le bas prix. Un avantage important est aussi leurs hautes propriétés dynamiques en conséquence d'une plus petite inertie électromagnétique.

L'intensité du courant et la tension au changement du mode de fonctionnement du circuit de soudage changent presque instantanément. L'utilisation des redresseurs en pont triphasé assure une plus petite pulsation du courant redressé et la charge plus équilibrée des phases du réseau à courant alternatif.

## 16.4 Postes de soudage à courant alternatif

Les postes de soudage à courant alternatif qu'on utilise aux usines et sur les chantiers de construction sont divisés en quatre groupes principaux :

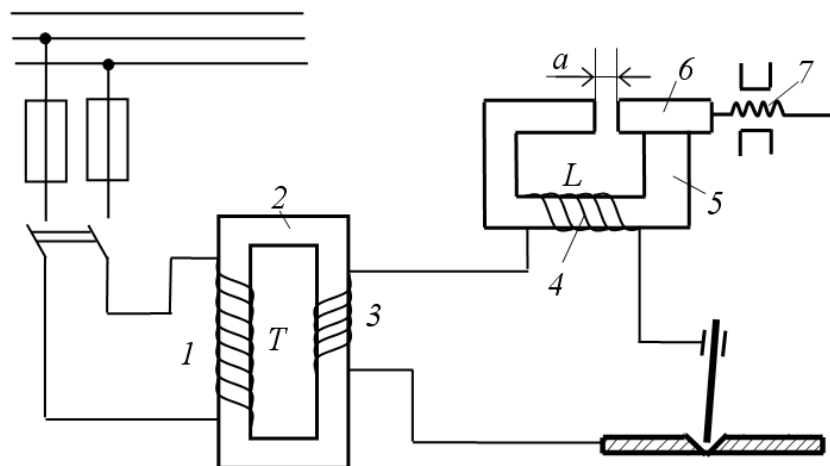
- avec une self séparée ;
- avec une self incorporée ;
- avec un shunt magnétique mobile ;
- avec dispersion magnétique augmentée et une bobine mobile.

Ces groupes se distinguent par la structure et par le schéma électrique. Les postes de soudage comprennent un transformateur abaisseur et une installation spéciale. Le transformateur assure l'alimentation de l'arc par le courant alternatif de tension à 60–70 V, et l'installation spéciale sert pour la création de la caractéristique extérieure tombante et le réglage de la valeur du courant de soudage.

**Les postes de soudage avec une self séparée** (fig. 16.5) comprennent un transformateur abaisseur  $T$  et une bobine d'arrêt  $L$ . Le transformateur a un carotte (un noyau magnétique) 2 des tôles estampées, fabriquées de l'acier fin à transformateurs de l'épaisseur de 0,5 mm. Les bobinages primaire 1 et secondaire 3 sont disposés sur le carotte. Le bobinage primaire du fil isolé est connecté au réseau du courant alternatif de tension à 220 ou 380 V.

Dans le bobinage secondaire fabriqué de la barre de cuivre est induit le courant de tension à 60–70 V. Une petite dispersion magnétique et une petite résistance des bobinages assure la chute de potentiel intérieure insignifiante et un haut rendement du transformateur.

En série avec le bobinage secondaire dans la chaîne de soudage est connecté un bobinage 4 d'une self  $L$  (régulateur de courant). Le carotte (le noyau magnétique) de la self est composé des tôles minces d'acier à transformateurs et se compose de deux parties : immobile 5, dans laquelle se trouve un bobinage de self, et mobile 6, déplaçables à l'aide de dispositif de raccordement 7.



**Figure 16.5** – Transformateur de soudage avec une self séparée :  
1, 3 – en conséquence bobinage primaire et secondaire ; 2 – noyau ;  
4 – self ; 5, 6 – en conséquence les parties de noyau immobile et mobile ;  
7 – dispositif de raccordement ;  $a$  – entrefer

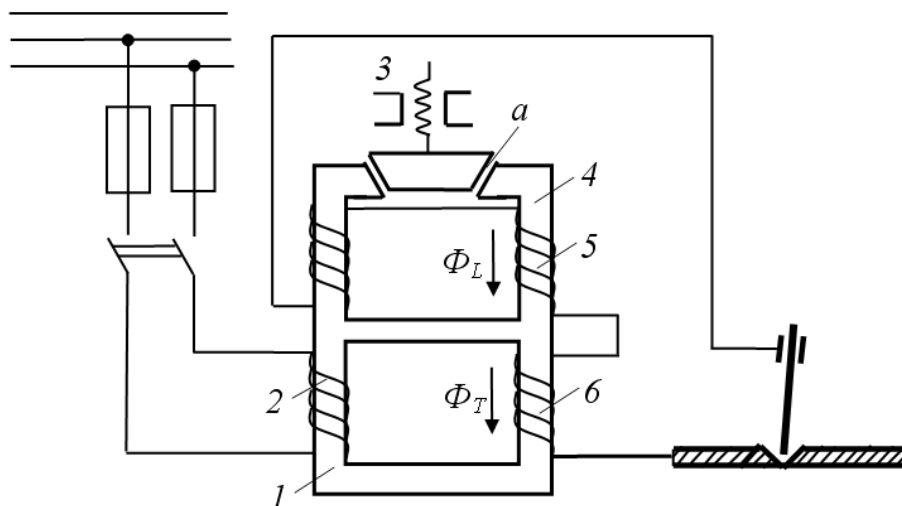
La self est destinée au réglage de l'intensité du courant de soudage et la création de la caractéristique extérieure tombante du transformateur sur l'arc. Lors de l'excitation de l'arc (au court-circuit) un grand courant, en passant dans le bobinage de la self, crée un puissant flux de force magnétique qui induit la f.é.m. de la self, dirigé contre la tension du transformateur. La tension secondaire, développée par le transformateur, est absorbée entièrement par la chute de potentiel dans la self. La tension dans le circuit de soudage atteint presque de la valeur nulle.

À l'apparition de l'arc l'intensité du courant de soudage diminue. Après quoi diminue la f.é.m. de l'auto-induction de self, qui est dirigé contre la tension du transformateur. Dans la chaîne de soudage s'établit la tension de service nécessaire à la combustion stable de l'arc, qui est plus petite que la tension de marche à vide. En changeant la valeur d'entrefer  $a$  entre noyau immobile et mobile, on change la résistance inductive de self et donc l'intensité du courant dans la chaîne de soudage.

Lors de l'augmentation de l'entrefer la résistance magnétique du noyau magnétique augmente, le flux de force magnétique s'affaiblit, la f.é.m. de l'auto-induction de la bobine et sa résistance inductive diminuent. Cela amène à l'augmentation de l'intensité du courant de soudage. À la réduction de l'entrefer l'intensité du courant de soudage diminue.

Les transformateurs de soudage de ce type sont largement utilisés sur les chantiers de construction, aux usines et lors du soudage des conduites magistrales.

**Les postes de soudage avec une self incorporée** (fig. 16.6). Le noyau magnétique du transformateur est composé de noyau principal 1, où se trouvent les enroulements primaire 2 et secondaire 6 du transformateur, et de noyau supplémentaire 4 avec un enroulement de self 5 (régulateur de courant). Le noyau supplémentaire est situé au-dessus du noyau essentiel et se compose des parties immobile et mobile, qui sont séparés par un entrefer  $a$ . La valeur désirée de l'entrefer  $a$  on établit à l'aide du dispositif de raccordement 3.

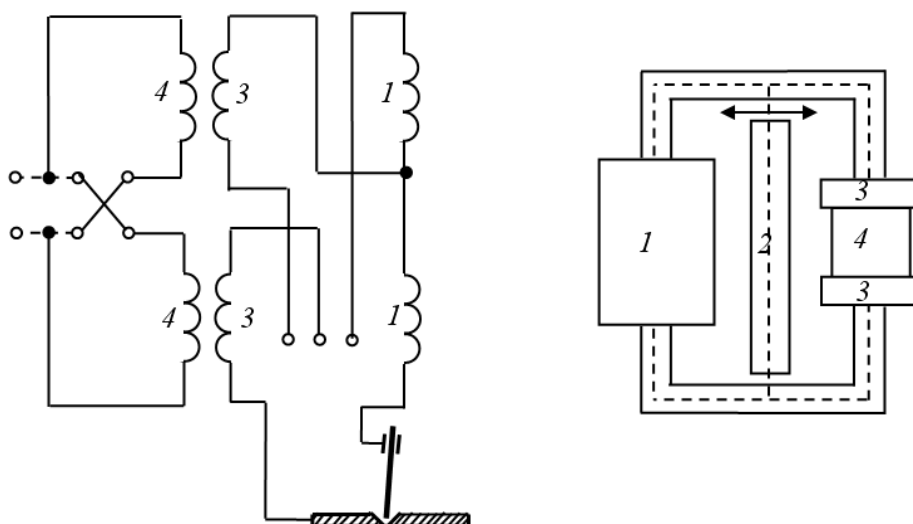


**Figure 16.6** – Transformateur de soudage avec une self incorporée :  
 1 – noyau principal ; 2 et 6 – en conséquence bobinages primaire et secondaire ; 3 – dispositif de raccordement ; 4 – noyau supplémentaire ; 5 – bobinage de la self ;  $a$  – entrefer

Le réglage de l'intensité du courant de soudage est produit par le changement de l'entrefer  $a$  : plus l'entrefer  $a$ , plus l'intensité du courant de soudage.



**Les postes de soudage avec un shunt magnétique mobile** (fig. 16.7) ont un circuit magnétique fermé, où sur un noyau sont disposés les bobinages primaires 4 et secondaires 3 et sur l'autre noyau – le bobinage réactif 1. Entre ces deux noyaux est installé un pivot 2 – le shunt magnétique. Le shunt ferme les flux de force magnétique créés par les bobinages primaire et réactif. Tout ça forme les flux de force magnétique de la dispersion, qui créent la résistance considérable inductive. On assure ainsi la caractéristique tombant extérieure du transformateur.



**Figure 16.7** – Transformateur de soudage avec un shunt magnétique mobile :  
1 – bobinage réactif ; 2 – shunt magnétique ; 3 et 4 – en conséquence  
les bobinages primaire et secondaire

La régulation de l'intensité du courant de soudage est produit par le déplacement du shunt magnétique le long de la direction du flux magnétique. Lors du déroulement du shunt la dispersion des flux de force magnétique des bobinages primaire et réactif diminue, en conséquence de quoi diminue la résistance inductive du transformateur. De plus la valeur de l'intensité du courant de soudage augmente.

**Les postes de soudage avec dispersion magnétique augmentée et une bobine mobile sans self.** Le transformateur a un circuit magnétique en forme des tiges. Deux bobines sont placées sur les tiges : une avec le bobinage primaire, et la deuxième avec le bobinage secondaire. Les bobines des bobinages sont connectées en parallèle. La bobine primaire est fixé immobile. La bobine secondaire se déplace par le mécanisme à vis à la main. La régulation de l'intensité du courant de soudage se réalise par voie du changement de la distance entre les bobines des bobinages primaires et secondaires du transformateur. Il y a moins de distance entre les bobines des bobinages, l'intensité du courant de soudage est plus grand.

Les transformateurs de soudage triphasés sont appliqués au soudage par l'arc triphasé par les électrodes accouplées. L'utilisation des postes de soudage triphasés a une grande signification économique, puisqu'ils assurent la haute productivité, l'économie de l'énergie électrique (le rendement atteint 0,9) et le chargement symétrique des phases du réseau à un haut facteur de puissance

( $\cos\phi \leq 0,8$ ). Cependant la soudure par le courant triphasé a reçu l'application limitée en raison de la complexité de l'équipement de soudage et l'inaptitude pour la soudure aux positions verticales et sous plafond.

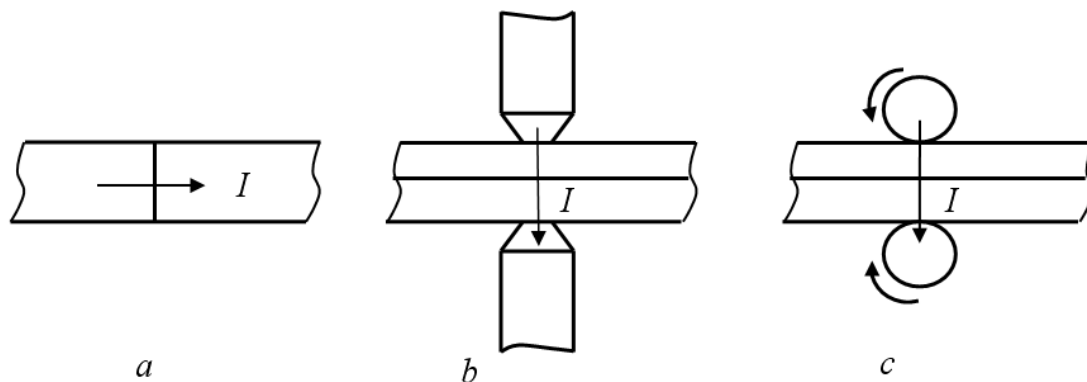
## 16.5 Installations de soudage par contacts

*Le soudage par contacts, ou le soudage sous pression, représente le mode du couplage des détails, dans lequel le dégagement concentré de chaleur dans la zone du joint est conditionnée par l'excès considérable de la résistance active dans cette place sur la résistance des pièces eux-mêmes.* La quantité de chaleur se détachant dans la zone du joint est définie selon la formule connue

$$Q = 0,24 I^2 R_{\text{pas}} t, \quad (16.1)$$

où  $R_{\text{pas}}$  est la résistance de passage dans la zone du joint.

Aux installations de soudage par contact se rapportent les installations de soudage bout à bout, par points et en ligne continue, dont les schémas sont montrés sur la figure 16.8. Ils ont trouvé une large application dans la construction, en particulier pour le soudage de l'armature et des charpentes métalliques.



**Figure 16.8** – Moyens principaux de soudage par contacts :  
a – bout à bout ; b – par points ; c – en ligne continue

La plus grande puissance des machines de fabrication industrielles, destinées au soudage par contacts, atteint 750 kVA. Ces machines permettent de souder les stockages par la section jusqu'à 3500 mm<sup>2</sup> et les pièces d'épaisseur jusqu'à 32 mm.

Pour le soudage par contact on peut utiliser le courant continu et alternatif. Cependant, dans la pratique principalement on applique le courant alternatif, de sorte que le courant de mille ampère et la tension à quelques volt, demandé au soudage, peuvent être reçus assez simple sur le courant alternatif à l'aide des transformateurs sans dépenses capitales considérables.

Alimentation de courant de soudage peut être soit continue (dans certains cas au soudage en ligne continue), soit discontinue.

La durée considérable du courant on soutient par les relais du temps, et le branchement et le débranchement du courant de soudage est accomplie par thyristors.

## **Conclusions principales**

1. Lors du soudage à l'arc électrique la fusion du métal des bords des pièces soudées et d'électrode ou le métal d'apport est effectué aux frais de la chaleur dégagée par l'arc électrique.

2. Le soudage à l'arc commence par un court-circuit de chaîne de soudage, provoquant dégagement de chaleur et de préchauffage rapide au point de contact. Cette étape de soudage exige la tension augmentée, qui conduit à de grands courants dans la chaîne de soudage (des courants de court-circuit). Ces derniers peuvent causer une surchauffe dans le câblage et dans les enroulements de la source de courant.

3. Dans la construction on applique les installations de soudage à courant continu et alternatif.

4. Les avantages des redresseurs de soudage électrique à courant continu sont un plus haut rendement, l'absence des parties tournant, une petite masse et les gabarits, le bas prix.

5. Les postes de soudage triphasés assurent l'économie de l'énergie électrique, le chargement égal des phases du réseau, un haut facteur de puissance  $\cos\phi$ .

6. Lors du soudage semi-automatique le dépôt de l'électrode le long de son axe dans la zone de l'arc est mécanisé et le déplacement de l'électrode le long de la couture soudée est produit par le soudeur à la main. Lors du soudage automatique toutes les opérations nécessaires au procédé de la soudure sont mécanisés.

## **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Expliquez en quoi consiste et comment se déroule le procédé de soudage ?
2. Que caractérise le soudage automatique et semi-automatique ?
3. Précisez les exigences principales aux sources d'alimentation de l'arc de soudage. Que l'on conditionne ces exigences ?
4. Expliquez la conception de générateur de soudage à courant continu.
5. Expliquez le principe de fonctionnement du transformateur de soudage avec self séparée.
6. Comment fonctionne le transformateur de soudage avec self incorporée ?
7. Comment fonctionne le transformateur de soudage avec un shunt magnétique mobile ?
8. Ce qui caractérise l'installation de soudage par contacts ?
9. Pour quels signes on classifie les convertisseurs de soudage à courant continu ?
10. Quelles sont les avantages et les inconvénients des redresseurs à souder ?
11. Pour quels signes on classifie les postes de soudage à courant alternatif ?
12. Quelles sont la destination et les particularités des installations de soudage par contacts ?

## Chapitre 17 :

### INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DES ÉQUIPEMENTS DE LEVAGE ET DE TRANSPORT

**Notions clés :** équipements de levage et de transport, *m* ; moteur de grue, *m* ; appareillage de commande, *m* ; contrôleur, *m* ; combinateur de commande, *m* ; joncteur, *m* ; démarreur magnétique, *m* ; relais, *m* (de temps, à maximum de courant, à minimum de courant, intermédiaire, thermique)

#### 17.1 Généralités sur le matériel de levage et de transport

Le matériel de levage et de transport (MLT), souvent utilisé sur les chantiers et aux entreprises de l'industrie de construction, sont les grues de chantier (à flèche, à tour, à colonne, et d'autres), ainsi que les ascenseurs de la diverse destination. Installation électrique de ces machines a les traits constructifs et destination similaires.

Le fonctionnement d'équipement électrique de MLT se caractérise par les particularités suivantes :

- le mode de fonctionnement – cadencé ;
- les changements fréquents de sens de rotation (révers) ;
- la nécessité du réglage de la fréquence de rotation d'entraînement ;
- les surcharges considérables, la vibration ;
- la difficulté d'accès pour l'entretien et la réparation ;
- le travail dans les conditions de saleté, de l'humidité, de la différence considérable des températures.

Pour assurer les conditions de travail énumérées l'équipement électrique de MLT doit répondre aux exigences de la solidité augmentée, de l'isolation de haute qualité et de la protection fiable contre les actions de l'environnement. Les machines et les appareils d'exécution spécial de grue répondent à ces exigences. L'équipement électrique de MLT par destination est divisée en ***matériel principal*** (d'entraînement électrique) et en ***matériel auxiliaire*** (l'équipement de l'éclairage de travail et de réparation, de chauffage).

***Les installations électriques principales sont :***

- les électromoteurs ;
- les appareils de commande des électromoteurs – les contrôleurs, les combineurs de commande, les joncteurs, les démarreurs magnétiques, les relais de commande ;
- les appareils du réglage de la fréquence de la rotation des électromoteurs – les rhéostats de démarrage et de régulation, les dispositifs de freinage ;
- les appareils de commande des freins – les électro-aimants de frein et les poussoirs électro-hydrauliques ;
- les appareils de protection électrique – les panneaux protecteurs, les joncteurs-disjoncteurs, les relais à maximum et relais thermiques, les

fusibles, les boîtes et les appareils de distributions, l'appareillage de protection des électromoteurs à maximum de courant et de nulle ;

- les appareils de la protection mécanique – les interrupteurs de fin de course et les limiteurs de capacité de charge, assurant la protection de la grue et ses mécanismes du passage des positions extrêmes et des surcharges ;
- les redresseurs à semi-conducteurs, assurant l'alimentation des bobinages de l'excitation des machines de freinage, les bobinages des amplificateurs magnétiques, les circuits de force et de commande de certains types de grues ;
- les générateurs de courant alternatif et continu, appliqué sur certains types de grues à tour comme les sources d'alimentation pour tout le matériel électrique ou le matériel électrique d'entraînement des mécanismes séparés ;
- les appareillages et les appareils utilisés pour les diverses commutations et le contrôle dans les circuits de force et de commande : les boutons, les interrupteurs, les commutateurs, les appareils de mesure.

***Les installations électriques auxiliaires sont :***

- les appareils d'éclairage (les lampes, les projecteurs) ;
- les appareils de chauffage électrique (les fours électriques, les convecteurs) ;
- les appareils du système d'alarme sonore (les sonneries, les sirènes) ;
- les appareils de commande et les protections (les transformateurs, les interrupteurs, les fusibles etc.), installés dans les chaînes de l'éclairage et le chauffage.

## **17.2 Électromoteurs du matériel de levage et de transport**

Pour MLT on applique les machines électriques à courant continu et à courant alternatif. L'installation et le principe du travail des MCC étaient examinée dans le chapitre 10.1, les machines à courant alternatif – dans le chapitre 11.2. Dans le chapitre donné nous examinerons les particularités des électromoteurs du MLT.

**17.2.1 Electromoteurs de grues.** Les électromoteurs de type spécial de grue sont destinés au travail comme dans le local et en plein air. Par conséquent, ils sont accomplis fermé, avec l'autoventilation (les moteurs à induction) ou avec la ventilation indépendante (les MCC) et avec l'isolation résistante à l'humidité. Puisque les moteurs sont destinés pour les conditions lourdes du travail, on les fabrique de la solidité augmentée. Tous les moteurs de grue se caractérisent par leur capacité de surcharge augmenté, par grand couple de démarrage à relativement petits courants de démarrage et une petite durée d'accélération. La relation des couples de démarrage aux couples nominales est variée entre 2,3–3,2.

Les électromoteurs de grue à bagues de la série MTF, MTH, 4MTH et à cage 4MTKF sont destinés au entraînement des mécanismes, dont le fonctionnement est caractérisé par les modes courtes durée et cadencé. La série des électromoteurs de la 4-ème élaboration par comparaison avec MTF et MTKF sont comptées sur la

température élevée de la chauffe et s'en distinguent par les plus petits gabarits et la masse.

Les moteurs asynchrones de grue ont la désignation comprenant les lettres et les chiffres : MT – à rotor bobiné, MTK – à rotor à cage d'écureuil. La classe de résistance à la chaleur du moteur est désignée par une lettre. Les moteurs avec l'indice B (MTB et MTKB) ont l'isolation de résistance à la chaleur de classe B avec la température admissible de 130°C. Les moteurs avec l'indice P (MTP et MTKP) ont l'isolation de la classe P avec la température admissible de 155°C. Les moteurs MT et MTK sont faits avec l'isolation de la classe E, avec la température admissible de 120°C.

Le premier chiffre du nombre de trois chiffres (0 ... 7) après la notation littérale caractérise le diamètre conventionnel extérieur paquet du stator, le deuxième chiffre – le numéro d'ordre de la série, le troisième chiffre – la longueur conventionnelle le cardiaque du stator. Le chiffre après le tiret indique le nombre de pôles de la machine. Par exemple, la désignation MTKF 412-8 signifie le moteur de grue à cage, du 4-ème gabarit, la 1-ère série, la 2-ème longueur, à huit pôles. Ou bien MTP-411-8 – le moteur de grue à rotor bobiné, du 4-ème gabarit, la 1-ère série, la 1-ère longueur, à huit pôles, avec l'isolation de classe P.

Sur le corps du moteur est fixée une plaque avec les paramètres principaux caractérisant le moteur et le nom de l'usine du fabricant. Dans la plaque on indique la puissance du moteur en kW à la charge nominale, le facteur de puissance  $\cos\phi$ , la vitesse de rotation, la tension nominale en cas de la liaison de ses bobinages par « l'étoile » ou par « le triangle », l'intensité du courant du rotor à la tension nominale.

Sur les grues à flèche on utilise principalement les moteurs à rotor bobiné, puisque ils permettent à l'aide de la résistance insérée dans la chaîne du rotor de régler la valeur du courant de démarrage et la couple de démarrage.

Le couple de démarrage à une certaine résistance de mise en marche peut être maximale. Le couple maximal répond au glissement critique et est défini selon le couple nominal et le coefficient de multiplicité du couple maximal. Des couples de démarrage et maximal dépend la capacité du moteur pendant la mise en marche surmonter les efforts d'inertie de la charge et les transmissions des mécanismes exécutifs.

En cas du régime stationnaire le couple, développé sur l'arbre du moteur, doit être toujours plus grand de couple de la charge levée. Si le moment transmis de la charge à l'arbre du moteur, est plus que son couple maximal, le moteur s'arrête, puisque il ne peut pas surmonter le moment statique. En ce cas le couple développé par le moteur sera critique. Si on ne coupe pas à temps le moteur, qui se trouve sous une grande charge, il surchauffe et peut brûler. En raison de cela il ne faut pas admettre les surcharges du moteur.

La capacité de surcharge des moteurs de grue à rotor bobiné à facteur de marche 25 % fait 2,5–3,4.

Les moteurs de grue travaillent en régime cadencé : les périodes du travail de courte durée alternent avec les périodes de longue durée de l'état coupé, quand le moteur se refroidit. À un tel régime le moteur se chauffe moins qu'au

travail de longue durée continue, de sorte qu'on peut le charger plus. La charge admissible du moteur dépend de facteur de marche et est défini par le standard à 15, 25, 40, 60 et 100% de la charge définie pour le mode de longue durée.

Les moteurs de MLT établissent sous les capots non hermétiques. Ils sont donc exposés à l'influence de la poussière, l'humidité, de températures hautes et basses. En raison de cela, sur MLT on utilise les moteurs dans l'exécution protégée.

**17.2.2 La mise en marche des moteurs asynchrones des appareils de levage.** La mise en marche des moteurs à cage d'écureuil on réalise à l'aide des démarreurs magnétiques. Un tel moyen est possible à condition que la puissance du moteur n'a pas au-dessus de 20% de la puissance de source d'alimentation du réseau électrique. La mise en marche des moteurs puissants à cage d'écureuil on réalise en commutant le bobinage de stator de « l'étoile » sur « le triangle » à une tension du réseau 220 V.

On fait le démarrage des moteurs à rotor bobiné à l'aide des contrôleurs et des rhéostats de démarrage, insérés dans la chaîne du rotor du moteur. Pendant la mise en marche on diminue graduellement la résistance du rhéostat, en augmentant la couple de démarrage et la vitesse de rotation du moteur.

La vitesse de la rotation des moteurs asynchrones à rotor robiné on règle en changeant la résistance du rotor, pour quoi on insère et coupe le rhéostat de démarrage. L'insertion du rhéostat à la chaîne du rotor diminue sa vitesse de rotation, et le débranchement du rhéostat – l'augmente. Le shuntage (le retrait de la chaîne) les parties du rhéostat on réalise par un controller. Régler la vitesse de rotation par ce moyen on peut seulement en cas de surpassement par le moteur du grand moment de résistance de la charge (un levage de la charge lourde, une rotation sous charge sur une longue position de flèche,). À vide avec la charge insignifiante la vitesse de rotation du moteur ne dépend pas pratiquement de la résistance dans la chaîne du rotor et s'approche de la synchrone. Le moyen du réglage de la vitesse de rotation par le changement de la résistance de chaîne du rotor est plus simple, mais avec cela et moins économe, en vertu de grandes pertes dans le rhéostat de démarrage.

La réversion des moteurs à induction est assuré par le changement du sens de rotation du champ magnétique. Pour réaliser réversion une seule fois on commute deux n'importe quelles phases du stator. En cas de la nécessité du changement périodique du sens de rotation du rotor on applique les démarreurs réversible, les controllers ou les interrupteurs commutant.

### **17.2.3 Moteurs électriques à courant continu**

Les moteurs électriques de grue à courant continu de types ДК, II et 2II sont produits sur la tension nominale 220 et 440 V. Dans la désignation du moteur (par exemple, ДК-309Б) les lettres désignent une série, et les chiffres – les dimensions conditionnelles. Le premier chiffre après le nom de la série (1 ... 8) – la valeur du moteur, qui caractérise le diamètre extérieur du paquet en acier d'ancre; le deuxième chiffre – la longueur de paquet pour la valeur donnée; troisième – la longueur de cardiaque du stator; la lettre après les chiffres – la classe de l'isolation.

Les autres paramètres et les traits constructifs (la tension, la puissance, la vitesse de rotation, le moyen de refroidissement) se caractérisent par le numéro de référence.

**17.2.4 Générateurs à courant alternatif et continu.** Comme nous avons déjà mentionné dans le chapitre 4 les générateurs transforment l'énergie mécanique de la rotation à énergie électrique. Sur les grues de chantier on utilise les générateurs de courant alternatif (synchrone) et de courant continu d'une puissance de 50 à 100 kW.

Le générateur fait partie de l'installation motrice du grue, en recevant la rotation du diesel-moteur par le manchon. Sur les grues électriques à courant continu en cas de l'alimentation du réseau extérieur du courant alternatif le générateur est amené à la rotation par un moteur inséré dans le réseau extérieur électrique.

### 17.3 Eléments d'équipement de la gestion

**17.3.1 Les contrôleurs** (en anglais – controllers) servent pour la gestion du travail de l'électromoteur, i.e. sa mise en marche, le réglage de la vitesse de rotation, l'arrêt et le changement de sens du mouvement (inversion). Les contrôleurs, utilisés pour le commande des électromoteurs de grue, sont divisés selon le principe de fonctionnement en deux groupes :

*de la gestion directe*, ou les contrôleurs de puissance, qui ferment ou ouvrent les circuits de puissance du moteur à l'aide des installations de contact du contrôleur à commande manuelle ;

*de la télécommande*, ou les contrôleurs magnétiques, qui sont dirigé à l'aide des combinateurs de commande, commutant les circuits de commande.

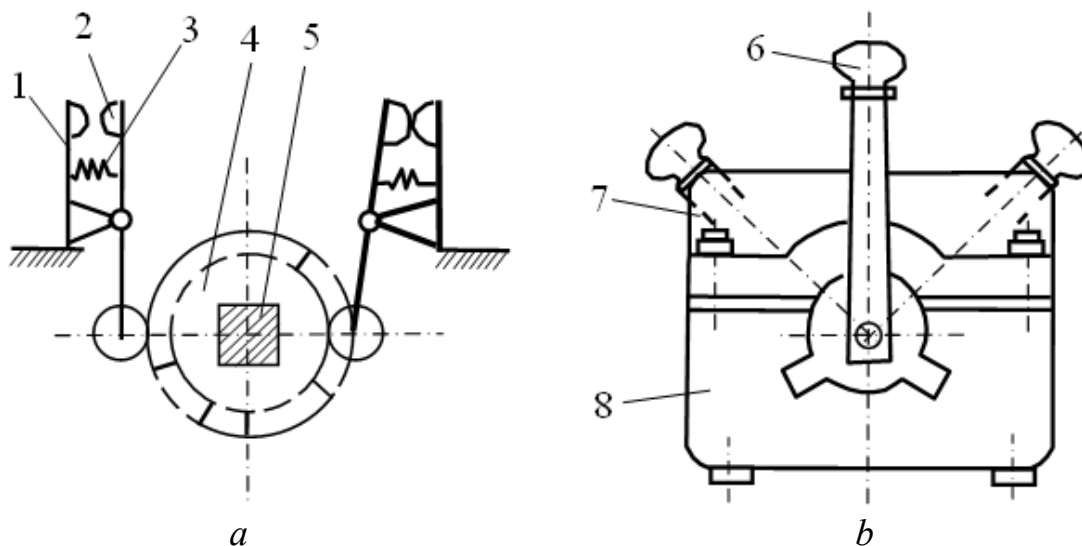
On peut citer comme les contrôleurs de puissance, appliqués sur les grues à tour, les contrôleurs à cames du courant alternatif « KKT » (fig. 17.1). Les parties principales du contrôleur à came sont les éléments de contact et l'arbre 5 avec les rondelles à cames 4. Chaque élément de contact comprend un support 1, le levier mobile 2 avec une roulette et un contact mobile, et le ressort de transmission 3 assurant la fermeture des contacts mobiles et immobiles. Les éléments de contact sont fixés sur le corps 8 du contrôleur. L'arbre avec les rondelles à cames (le tambour à cames) tourne dans les roulements fixés dans le corps du contrôleur. La rotation du tambour à cames se réalise à l'aide de la manivelle 6, qui est montée sur la fin de l'arbre.

On produise deux types des controllers : les controllers pour commande d'un et deux moteurs.

*Les controllers magnétiques* représentent le panneau dans l'exécution ouverte ou protégée, où on installe les conjoncteurs, les relais de la gestion, les fusibles et d'autres appareils de commande et de protection électrique.

La gestion des bobines des conjoncteurs et le relais du contrôleur magnétique se fait habituellement par un *commandocontrôleur*. Le fonctionnement de combinateur de commande est similaire au fonctionnement du contrôleur à came « KKT », mais la quantité de chaînes commutées chez lui est moins, les contacts sont en argent de type de pont.





**Figure 17.1** – Contrôleur à cames « KKT-61 » :

*a* – système de contact ; *b* – vue générale ; 1 – support d'élément de contact ; 2 – levier mobile avec une roulette et un contact mobile ; 3 – ressort de transmission ; 4 – rondelle à came ; 5 – arbre ; 6 – manivelle ; 7 – plaque de fermetur ; 8 – corp

Les contrôleurs magnétiques possèdent une série des avantages en comparaison de contrôleurs de puissance :

- on dirige par un contrôleur magnétique de n'importe quelle puissance à l'aide de l'appareil de petites dimensions – d'un commandocontrôleur, sans application de l'effort considérable musculaire du mécanicien ;
- on peut installer les contrôleurs magnétiques en dehors de la cabine, dans n'importe quelle place sur la grue ;
- les contacts des contrôleurs magnétiques sont plus résistants à l'usure que les contacts des contrôleurs à cames.

L'application des contrôleurs magnétiques permet d'automatiser les opérations de la mise en marche et de freinage du moteur que simplifie la gestion de l'entraînement et protège le moteur contre les surcharges.

Cependant les schémas des contrôleurs magnétiques sont considérablement plus complexe, ils ont plus grand nombre des électro appareils que les contrôleurs de puissance, et donc ils demandent un service plus soigneux.

**17.3.2 Conjoncteurs et démarreur magnétique. *Le conjoncteur – c'est un appareil électrique destiné au branchement et au débranchement des électrorécepteurs de forte puissance.***

Le principe de fonctionnement du conjoncteur consiste en suivant. Lorsqu'une tension est appliquée à la bobine de l'électro-aimant sous son action se renferment les contacts de puissance du conjoncteur et se réalise branchement d'électrorécepteurs au réseau. Lors de la dépose de la tension à la bobine de l'électro-aimant, sous son action s'ouvrent les contacts de puissance de conjoncteur et récepteur est désactivé.

En fonction des types de courant on distingue les **conjoncteurs de courant continu et de courant alternatif**. D'après le nombre des chaînes simultanément commutées les conjoncteurs sont divisés sur les **conjoncteurs unipolaires** et les **conjoncteurs multipolaires**. Les conjoncteurs de courant continu sont produits mono- et bipolaire, et les conjoncteurs de courant alternatif : - deux - trois- et quatripolaire.

Les contacts de puissance sont massifs, capable de surmonter une grande intensité du courant, et les contacts de blocage – petits, puisque au circuit de commande l'intensité du courant n'excède pas 5–10 A

À la rupture des chaînes électriques se trouvant sous la charge, entre les contacts de puissance du conjoncteur apparaît l'arc électrique, qui provoque l'usure accélérée des contacts et même leur destruction. Pour la réduction du temps de la combustion de l'arc on applique de divers systèmes étouffements de l'arc.

Les conjoncteurs sont utilisés dans les contrôleurs magnétiques des grues à tour à titre des conjoncteurs linéaires de la chaîne de la protection et dans les inverseurs.

Le **démarrateur magnétique** c'est un mini conjoncteur de l'exécution spéciale destinée à la mise en marche, l'arrêt et l'inversion des électromoteurs asynchrones, ainsi que pour la commutation (branchement et débranchement) d'autres chaînes électriques. Le démarreur magnétique peut avoir les relais insérés pour la protection de la chaîne électrique contre les surcharges.

Sur les grues à tour on applique les démarreurs magnétique pour le commande des moteurs à cage, dans les contrôleurs magnétiques et pour la commutation des autres chaînes de puissance.

**17.3.3 Relais de commande et de protection.** Pour le commande et la protection des électromoteurs on utilise les relais de temps, les relais intermédiaires, le relais du courant minimal, les relais du courant maximum, les relais thermiques.

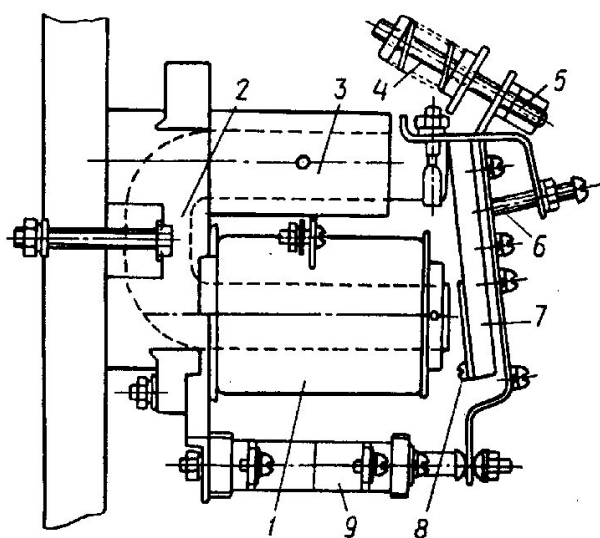
Relais de temps sont appliqués dans les contrôleurs magnétiques de grues pour branchement et débranchement automatique des circuits de commande, avec un certain retard de temps.

Sur la figure 17.2 est montré la constitution de principe du relais temporisé du courant continu. La bobine du relais est affermie sur la culasse. Vers la culasse sur le support balançant prismatique est fixé l'ancre, qui en l'état coupé se retient par le ressort de retour.

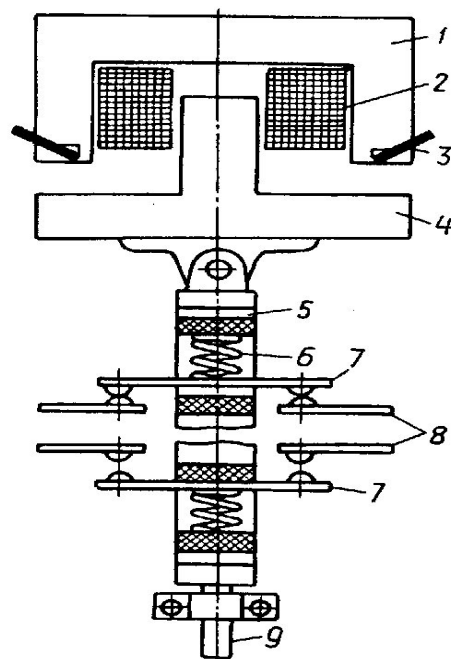
Le fonctionnement du relais temporisé est fondé sur ce que, à la conséquence du phénomène de l'auto-induction, au débranchement de la bobine le courant dans elle diminue graduellement. Quand on branche la bobine sous tension, dans le système magnétique du relais apparaît le flux de force magnétique, sous l'action de qui l'ancre vite, sans extrait du temps, est attiré vers la culasse. Si on débranche la bobine, le courant dans la bobine, qui diminue graduellement, soutiendra le flux de force magnétique du relais. En vertu de cela l'ancre reste encore un certain temps attiré vers la culasse. Quand la force d'attraction de l'ancre vers le joug deviendra moins que l'effort du ressort de retour, l'ancre du relais sous son action s'écartera de la bobine. Le temps, dont l'ancre reste attiré après le

débranchement de la bobine, s'appelle le temps d'exposition du relais. Puisque l'ancre est liée aux contacts mobiles du système de contact, les contacts sont ouverts (ou se renferment) avec l'exposition du temps. Le temps de l'exposition dépend du type du relais, le moyen du débranchement de la bobine et se trouve dans la limite de 0,2–0,3 s.

Le **relais intermédiaire** est appliqué dans les couplages de grue à titre de l'appareil auxiliaire, si l'appareil principal ne possède pas la quantité suffisante des contacts demandés pour le travail du schéma, ainsi que, si la puissance des contacts de l'appareil principal est insuffisante à la rupture ou au branchement du circuit de commande. La constitution du relais intermédiaire est montrée sur la figure 17.3.



**Figure 17.2** – Relais temporisé du courant continu : 1 – bobine ; 2 – culasse ; 3 – magnétique ; 4 – ressort de rappel ; 5 – écrou de réglage ; 6 – vis de butée ; 7 – ancre ; 8 – pièce d'épaisseur amagnétique ; 9 – système de contacts



**Figure 17.3** - Relais intermédiaire du courant alternatif : 1 – culasse ; 2 – bobine ; 3 – spire en court-circuit ; 4 – ancre ; 5 – latte isolante ; 6 – ressort de contacts ; 7 – pont de contacts ; 8 – contacts immobiles ; 9 – pivot

Les relais intermédiaires sont disponibles avec des bobines de courant alternatif et courant continu. Le relais contient de trois à six contacts. Les contacts mobiles de relais sont de type en pont. Ils sont fixés sur la tige joint à l'ancre. Lorsque la bobine est alimenté en tension, l'ancre est attiré vers la culasse et les contacts associés de type en pont ferment ou ouvrent les contacts immobiles, en accomplissant les commutations demandées dans le schéma de la gestion. Les contacts de relais intermédiaire sont calculés sur une petite l'intensité du courant (jusqu'à 20A) et peuvent faire partie seulement des circuits de commande.

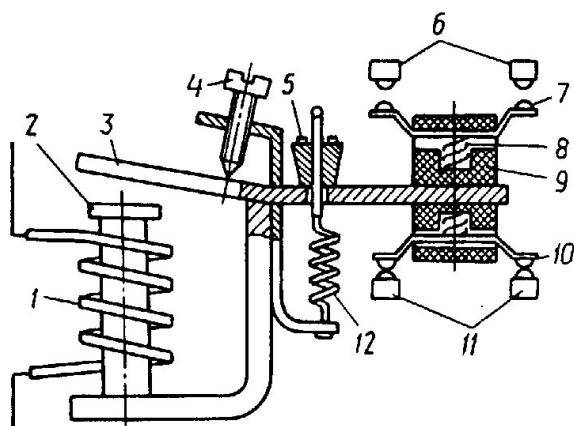
Le **relais à minimum de courant**. Les relais appliquent dans le schéma d'entraînement du treuil avec la voiture de frein pour le contrôle de l'intensité du courant du bobinage de l'excitation.

La constitution du relais à minimum de courant est montrée sur la figure 17.4. La bobine du relais est connectée dans le circuit d'excitation de la machine de freinage. Quand la force du courant dans ce circuit atteint le seuil de déclenchement de relais, dans lequel l'attraction de l'ancre à l'embout polaire 2 sera plus de force d'opposition du ressort 12, le relais s'allume. En ce cas les contacts supérieurs 6 se touchent et les contacts bas 11 se séparent.

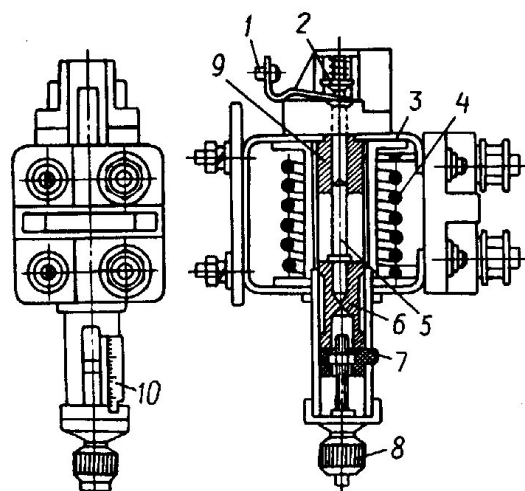
On peut régler la valeur du courant de déclenchement du relais par voie du changement de la force de la tension du ressort de retour à l'aide d'écrous 5 et en changeant l'entrefer dans l'électro-aimant par la vis 4. À l'affaiblissement de la tension du ressort ou à la réduction de l'intervalle aérien le relais est activé à une plus petite intensité du courant dans la bobine.

Le **relais à maximum de courant** – le relais électromagnétique de courant à action instantanée. Ces relais sont appliqués pour la protection des électromoteurs contre l'endommagement à l'augmentation rude de l'intensité du courant, par exemple, à une grande surcharge, l'insertion rude, un court-circuit.

La constitution du relais à maximum de courant est montrée sur la figure 17.5.



**Figure 17.4 - Relais à minimum de courant :**  
1 – bobine ; 2 – culasse ; 3 – ancre ; 4 – vis ;  
5 – écrou ; 6, 7, 10, 11 – contacts ; 8, 12 – ressorts ;  
9 – fers

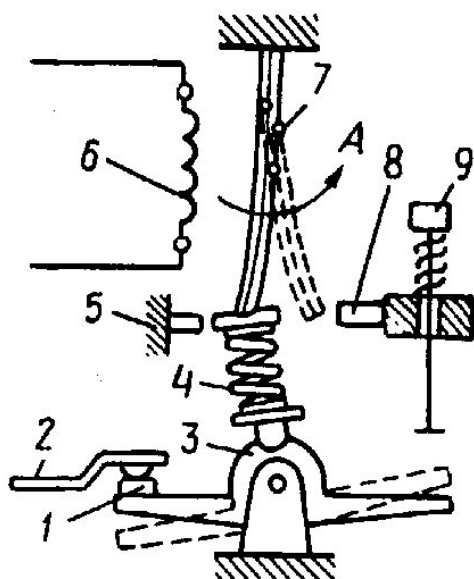


**Figure 17.5 - Relais à maximum de courant :**  
1 – contact immobile ; 2 – pont de contacts ;  
3 – noyau magnétique ; 4 – bobine ;  
5 – poussoir ; 6, 7, 9 – douilles ; 8 – vis de  
réglage ; 10 – règle graduée

La bobine du relais fait partie successivement de la phase du circuit d'alimentation du moteur, et les contacts 1 – du circuit de commande de l'appareil, qui assure le débranchement automatique de la chaîne de l'alimentation du moteur. Lors du passage du courant dans la bobine est excité le champ magnétique, qui augmente avec l'augmentation de la force du courant. Ce champ se renferme par noyau magnétique et agit sur le poussoir, fixé au manchon 6. Sous l'action des forces magnétiques le poussoir avec le manchon s'enlève en haut et, si l'intensité du courant plus de valeur donnée, sur laquelle le relais est réglé, actionne le pont de contact, en ouvrant les contacts. Les relais séparés dans ce cas n'ont pas des leurs propres contacts, et sont établis à l'installation avec un contact pour tous les relais. Un tel relais de groupe peut comprendre quatre bloc relais.

On règle le relais sur l'intensité du courant de déclenchement par rotation de la vis 8 conformément à l'échelle d'un pointeur, qui est reliée à cette vis. Que plus bas est omis d'ancre du manchon, d'autant plus grande intensité de courant est nécessaire pour le déclenchement du relais.

Le **relais thermique** sert à protéger les moteurs contre les petits, mais de longues durées surcharges, dont le courant du moteur à 30 % et plus dépasse la valeur nominale. Le relais thermique fonctionne à la signification définie de l'intensité du courant pendant un certain intervalle du temps.



**Figure 17.6** - Relais thermique :

- 1 – contact mobile ; 2 – contact immobile ;
- 3 – sabot ; 4 – ressort ; 5, 8 – supports ;
- 6 – élément de chauffage ; 7 – bilame thermique ; 9 – dispositif de retour

L'élément principal du relais thermique (fig. 17.6) est un bilame thermique soudée en deux métaux avec différentes coefficients de la dilatation linéaire. Lorsque le bilame se chauffe par le courant de fonctionnement passant par l'élément chauffant (ou directement par le bilame) elle se replie à l'écart du métal dont le coefficient de la dilatation linéaire est plus petit. Dans le relais thermique le bilame s'appuie sur la fin supérieure du ressort. La fin inférieure du ressort presse sur un dépassement de sabot en plastique, qui est fixé sur un axe à la manière de la charnière. Dans la position montrée sur la figure 17.6 le mouvement de la plaque et de la fin supérieure du ressort se limite par le support 5.

Le ressort influence sur le dépassement de sabot ainsi qu'il est tourné en sens de petite aiguille, et le contact mobile, fixé sur lui, est fermé avec le contact immobile. Quand par l'élément de chauffage passe le courant augmenté, le bilame se chauffe et sa fin inférieure se déplace en direction de la flèche A. En conséquence de cela, la fin supérieure du ressort passe à droite et le sabot en plastique se tourne contre la petite aiguille (est montré par la ligne pointillée), et les contacts 1 et 2 sont ouverts. Les supports 5 et 8 limitent la position de la fin inférieure du bilame.

En position de départ le relais revient spontanément, quand la plaque bimétallique se refroidira (relais avec l'auto-retour). Le support 8 peut être retiré. Alors le relais revient à sa position initiale par l'installation de retour. Le relais fonctionne avec l'extrait du temps, qui est l'inverse de la force du courant. Plus l'intensité du courant dans l'élément de chauffage, moins le temps pendant lequel la plaque bimétallique chauffe jusqu'à l'activation du relais.

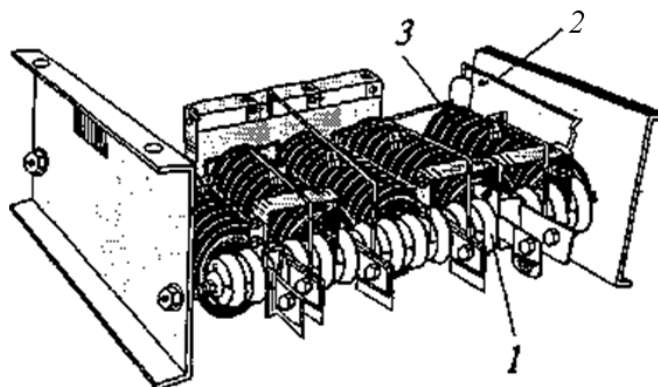
Le relais thermique ne fonctionne pas en cas de la croissance instantanée de l'intensité du courant, c'est pourquoi ne peut pas servir de la protection sûre contre les courts-circuits. Les relais thermiques sont utilisés dans les schémas du MLT pour la protection des moteurs à cage et sont installés dans les démarreurs magnétiques ou dans les conjoncteurs-disjoncteurs avec les déclencheurs thermiques ou combinés.

**17.3.4 Résistances.** Utilisés dans le matériel électrique des grues à tour les résistances sont divisés en deux groupes : les résistances de démarrage et de réglage, qu'on insère au réseau de force des électromoteurs, et les résistances utilisées dans les circuits de commande et d'alarme.

Les résistances de démarrage et de réglage font partie de la chaîne du rotor de l'électromoteur et servent pour d'accélération, de freinage et de réglage de la vitesse de rotation de l'électromoteur, ainsi que pour son freinage par contre-courant.

Dans les ***résistances de fil*** sur les supports métalliques, isolés selon les limites par les isolateurs de porcelaine, est enroulé le fil de constantan.

Les éléments des ***résistances en bandes*** (fig. 17.7) sont accomplis de bande 3 enroulés à la côte, affermie sur un support en acier à l'aide des porcelaine 1. Ces éléments se réunissent dans la boîte analogiquement aux résistances de fil.



**Figure 17.7** – Boîte avec les résistances en bandes :  
1 – isolateurs ; 2 – cavalier ; 3 – bande à fechal

Le rhéostat de démarrage et de réglage en fonction de la puissance et de la destination de l'électromoteur comprend une ou quelques boîtes des résistances.

On insère les rhéostats dans la chaîne du rotor du moteur ou on les coupe en train du travail à l'aide des contrôleurs. Les résistances sont calculées, en général, seulement sur l'insertion de courte durée au cours de la mise en marche ou du freinage du moteur. Le travail de longue durée des électromoteurs avec les rhéostats insérés (le manche du contrôleur n'est pas établi à la position extrême) est inadmissible, puisque en ce cas les résistances sont surchauffées fortement.

**17.3.5 Dispositifs de freinage.** Les ***machines de freinage*** sont appliqués dans l'entraînement électrique des treuils de levage pour obtenir des vitesses baissées du déplacement de la charge.

Sur les grues à tour on établit le moteur de freinage du courant alternatif TM-4A, représentant l'électromoteur asynchrone à cage de l'exécution spéciale, ayant une petite fréquence de la rotation.

Le moteur de freinage est calculé sur le travail de courte durée avec facteur de marche 15 % et doit être utilisé seulement pour de petits déplacements des charges.

L'***électro-aimants de freinage et les pousseurs électro-hydraulique*** sont utilisés pour libérer des freins dans les mécanismes de la grue.

L'***électro-aimants de freinage*** ont deux parties principales : un noyau magnétique et une bobine d'excitation. Le noyau magnétique se compose d'une culasse immobile et d'une ancre mobile. Lors du passage du courant dans la

bobine montée sur la culasse produit un champ magnétique, sous l'influence duquel l'ancre est attiré vers la culasse et par un système de leviers libère le frein.

On divise les électro-aimants de freinage en électro-aimants du courant alternatif et du courant continu.

**17.3.6 Les pousseurs électro-hydraulique** ce sont des machines qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique et dont l'organe d'actionnement (la tige) se déplace tout droit.

Par rapport aux l'électro-aimants de freinage les pousseurs électro-hydraulique ont plusieurs avantages :

- leurs dimensions et poids sont moins par rapport aux électro-aimants, dont les options sont similaire, leurs consommations d'électricité est en quelques fois moins ;
- la valeur d'effort de la pression du pousseur hydraulique ne dépend pas de la position du piston, tandis que dans électro-aimant l'effort change en fonction de la valeur de l'entrefer entre la culasse et l'ancre ;
- avec l'augmentation de la charge externe jusqu'à la valeur de l'effort maximum de pousseur le piston s'arrête. Lors de cela ne se passe pas ni la surcharge du moteur, ni les endommagements mécaniques des éléments du pousseur.

**17.3.7 Redresseurs à semi-conducteurs** servent pour redresser le courant alternatif en courant continu, qui est utilisé sur les grues à tour pour l'alimentation des bobinages d'excitation des machines de freinage et des électro-aimants de freinage, des circuits de commande des bobines de contacteurs et d'amplificateurs magnétiques, pour le freinage dynamique des moteurs asynchrones, ainsi que pour l'alimentation des circuits limiteurs de charge et des anémomètres.

**17.3.8 Interrupteurs de fin de course** servent à limiter l'action des mécanismes de la grue, à l'activation des chaînes du système d'alarme, et également sont utilisés comme interrupteurs du blocage.

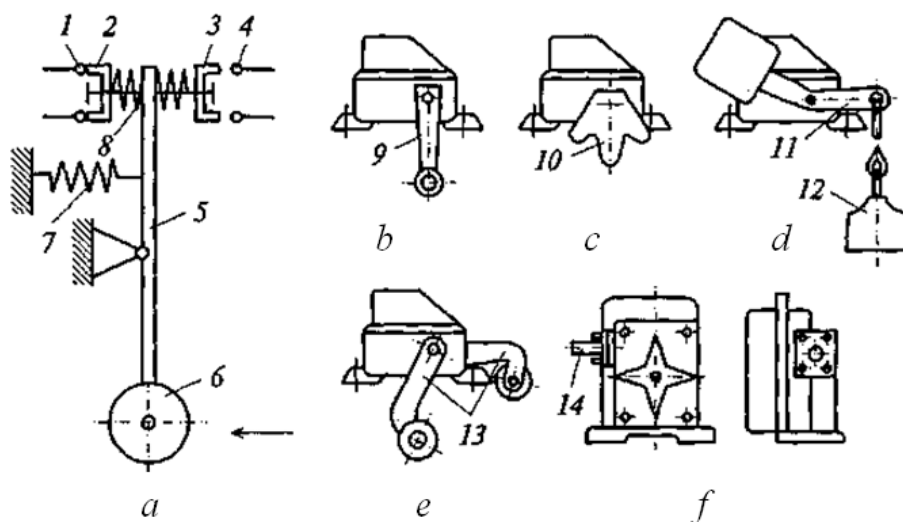
Selon le principe de fonctionnement on subdivise les interrupteurs de fin de course en :

les interrupteurs de levier (fig. 17.8), qui déclenchent sous l'action des appareils de coupure ;

les interrupteurs d'entraînement (à la broche), qui sont reliés rigidement à l'arbre du mécanisme et se déclenchent après la rotation de l'arbre de l'interrupteur à un certain angle.

**17.3.9 Fusibles** sont destinés à la protection du matériel électrique et des réseaux électriques contre les grands courants apparaissant lors de courts-circuits et lors des surcharges considérable (50% et plus).

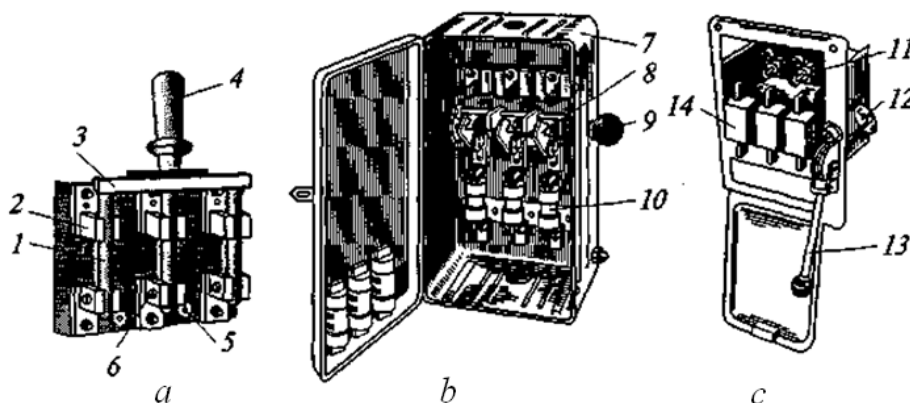
Dans le fusible est placé conducteur à bas point de fusion (lame fusible), à travers laquelle passe le courant de la chaîne protégée. Lors de l'augmentation du courant une grande quantité de chaleur se dégage, sous l'influence de laquelle lame fusible se fond et interrompt le circuit. Sur des grues à tour on applique les fusibles tubulaires sans et avec noyé dans un sable.



**Figure 17.8** – Interrupteurs de fin de course :

*a* – de levier ; *b* – KY-70 ; *c* – KY-704 ; *d* – KY-703 ; *e* – KY-706 ; *f* – BY-250 ;  
 1, 4 – contacts immobiles ; 2, 3 – ponts de contact ; 5, 9, 13 – leviers ; 6 – rouleau ;  
 7 – ressort de rappel ; 8 – ressort des ponts de contact ; 10 – secteur ; 11 – levier à  
 contrepoids ; 12 – charge ; 14 – arbre d'entrée

**17.3.10 Les interrupteurs et les boîtes de force distributives** servent (fig. 17.9,) à la commutation infréquente (les fermetures et les ruptures) des chaînes électriques du courant alternatif et continu de la tension jusqu'à 500 V. Sur les grues à tour on applique les interrupteurs dans les panneaux protecteurs et dans les boîtes de force distributives. Les boîtes de force distributives on utilise sur les grues à tour à titre des interrupteurs d'introduction (portaux) établis dans la partie inférieure de la construction métallique de la grue, sur le portail ou sur la croisée de type courant.



**Figure 17.9** – Appareils de commutation infréquente des chaînes électriques :

*a* – interrupteur à couteaux ; *b* – boîtes de force distributive ; *c* – bloc fusible-interrupteur ;  
 1 – contact en couteau ; 2, 11 – mors de serrage ; 3 – traverse ; 4, 9, 13 – manivelles ;  
 5 – planche isolante ; 6 – comptoir de contact ; 7 – boîte ; 8 – interrupteur inséré ;  
 10 – fusibles ; 12 – système de levier ; 14 – couteau-fusible mobile

L'interrupteur à couteaux (fig. 17.9, *a*) a un ou plusieurs couteaux mobiles 1, qui sont fixés comme charnière aux comptoirs de contact 6. Les couteaux sont liés par traverse 3 du matériel isolant. À l'insertion de l'interrupteur les couteaux sont introduits dans les mors de serrage 2. Vers les mors de serrage adjoignent des fils



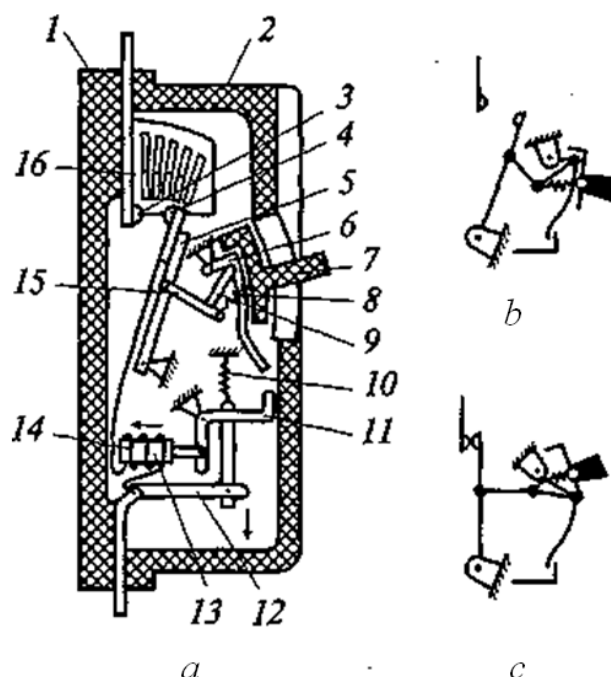
de la source d'alimentation, et aux compteurs de contact des couteaux – des fils de la chaîne insérée par l'interrupteur. On dirige par l'interrupteur (connectent et déconnectent) à l'aide de la manivelle 4.

Par le nombre des circuits à connecté on distingue les interrupteurs à 1, 2 et 3 pôles).

Une boîte de force distributive (fig. 17.9, *b*) représente la boîte 7 dans laquelle est inséré un interrupteur 8 et des fusibles 10. L'interrupteur est dirigé à l'aide d'entraînement à levier par une manivelle latérale 9. La manivelle comporte un mécanisme de blocage grâce auquel on ne peut pas ouvrir le couvercle de la boîte à l'interrupteur allumé et allumer l'interrupteur avec couvercle ouvert. Dans le boîtier est prévu une borne pour attacher le fil de terre. Dans certaines constitutions des boîtes de force distributives au lieu des interrupteurs et des fusibles installés séparément on utilise un bloc de fusible-interrupteur (fig. 17.9, *c*). Le bloc comprend les mors de serrage 11 installés sur le panneau isolant, et les couteaux mobiles 14 accomplis avec les fusibles. Le bloc s'allume et s'éteint par manivelles 13, liée aux couteaux à l'aide du système de levier 12.

Sur toutes les boîtes distributives, qui sont établies à titre de l'interrupteur portal sur une grue ou à titre de l'interrupteur sur la boîte de connexion chez la voie de rails, on prévoit l'installation pour la fermeture de la boîte avec une manivelle établit à la position « éteint ». Elle doit être accomplie de manière que dans la position « fermée » on ne pouvait pas allumer manivelle, et à la manivelle dans la position « éteint » – fermer l'installation.

**17.3.11 Interrupteurs automatiques.** Interrupteurs automatiques (disjoncteurs) sont destinés à l'arrêt automatique des chaînes électriques en cas de la violation des conditions normales de leur travail (par exemple, à la surcharge ou le court-circuit), ainsi que pour la commutation inférieure.



**Figure 17.10** – Interrupteur automatique A-3100 : *a* – schéma constructif ; *b* – système de levier de l'automate avant l'allumage ; *c* – système de levier de l'automate après l'allumage

Le disjoncteur (fig. 17.10, *a*) se compose d'un corps (une base 1 et un couvercle 2), une installation commutante (les contacts immobiles 3 et les contacts mobiles 4), une chambre de soufflage 16, un mécanisme de commande et les déclencheurs du courant maximum.

Le mécanisme de contrôle inclut une manivelle 7, un article bouclé 6, les ressorts 8 et 10, les leviers 9 et 15.

Le disjoncteur coupe un circuit électrique (ouvre ses contacts de force) lors du fonctionnement des déclencheurs à maximum de courant.

Selon le principe de l'action les déclencheurs sont : thermique,

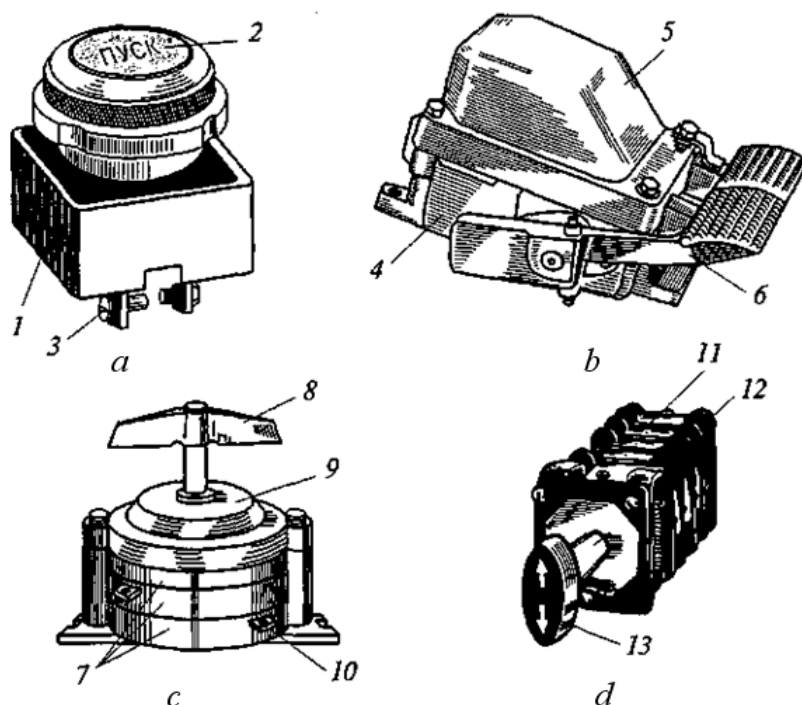
électromagnétique et combiné, comprenant les déclencheurs successivement insérés thermiques et électromagnétiques. L'élément principal du déclencheur thermique est une bilame thermique.

Le déclencheur électromagnétique comprend une bobine 14 et un cardiaque 13. À l'apparition du courant du court-circuit le cardiaque est impliqué instantanément dans la bobine. De plus le levier 11 se tourne, libère de l'engrenage le détail façonné 6 et l'automate est déconnecté sans extrait du temps.

**17.3.12 Appareils de commande manuelle.** Pour les commutations infrequentes des circuits de commande et d'éclairage dans les schémas des grues à tour on applique les boutons de commande, les interrupteurs de commande, les interrupteurs à paquet et les commutateurs universels.

**Boutons de commande** (рис. 17.11, *a*) servent pour fermer ou ouvrir les circuits des bobines de contacteurs, des démarreurs magnétiques et des relais, ainsi que pour activer le signal sonore. Kit de boutons, installés dans une enveloppe, est appelé le clavier de touches.

**Interrupteurs de commande** avont l'entraînement de manuelles et de pédale (de pied). Les interrupteurs avec l'entraînement de manuelles sont utilisés pour l'arrêt du conjoncteur linéaire, d'habitude on les appelle les interrupteurs d'avarie. Les interrupteurs de pédale (fig. 17.11, *b*) sont appliqués pour activation des circuits de commande, par exemple pour la commande de vitesse d'atterrissage des treuils de levage dans le schéma par contre-courant. Les contacts des interrupteurs de commande sont calculés sur l'intensité du courant jusqu'à 10 A.



**Figure 17.11** – Appareils commande manuelle pour la commutation des circuits de commande et d'éclairage des grues : *a* – bouton de commande ; *b* – l'interrupteur de pédale ; *c* – interrupteur à paquet ; *d* – commutateur universel

**Interrupteurs à paquet** (fig 17.11, c) sont appliqués dans le schéma des grues pour l'insertion des circuits de commande et d'éclairage. A l'aide des interrupteurs à paquet on insère l'éclairage ouvrier et les appareils de chauffage.

L'interrupteur se compose de deux sous-éléments : un système de contact et un mécanisme de commutation.

On produit les interrupteurs à paquet dans l'exécution ouverte et protégée sur l'intensité du courant de 10 jusqu'à 60 A.

**Commutateur universel** (fig. 17.11, d) – ce sont les appareils électriques utilisés pour pas fréquents commutations des circuits électriques. Sur les grues à tour, dont on est prévu la commande des mécanismes de la cabine ou du portable pupitre de commande, on utilise les commutateurs universels pour la commutation du schéma de commande sur la cabine ou sur le pupitre. Sur certaines grues les commutateurs sont utilisé comme les appareils de commande pour la régulation des contrôleurs magnétiques.

**17.3.13 Prises de courant.** À l'aide de la prise de courant électrique la partie tournante de la grue est lié au réseau d'alimentation et aux appareillages électriques, installés sur la partie non rotatif de la grue.

Selon le principe de fonctionnement les prise de courant des grues à tour sont divisés en les prise circulaires (fig. 11.12) et sans circulaires.

**La prise de courant sans circulaire** représente une traîne des fils souples reliant les bornes de la chaîne sur les parties tournant et immobile de la grue. La



Figure 17.12 – Prise de courant circulaire

longueur les fils est choisie suffisante pour deux tours complets de la grue ( $720^\circ$ ) dans les deux sens de la position initiale.

La prise de courant sans circulaire est appliquée sur la plupart des grues à tour, car elle est beaucoup plus facile et plus fiable de circulaire. Lors de l'utilisation des grues avec prises sans circulaires il faut systématiquement observer le travail du limiteur de rotation, puisque sa panne peut entraîner à la torsion et à la rupture de câbles flexible de la traîne.

**17.3.14 Fils et câbles.** Pour la connexion du matériel électrique à la chaîne extérieure, ainsi que pour le lien électrique entre les électromoteurs et les électroappareils sur la grue à tour on applique les fil et les câbles.

Les fils et les âmes des câbles de toutes les chaînes électriques de la grue doivent avoir le marquage bien visible en lettre et en chiffre.

Conformément aux normes de l'installation des appareils électriques le câblage électrique sur les grues se fait par des fils et des câbles de cuivre. La

section des fils et les âme des câbles on choisit par valeurs durables des courants admissibles en fonction de la puissance consommée par un récepteur. Toutefois, en vertu de la solidité mécanique la section des fils de cuivre doit être pas moins de  $2,5 \text{ mm}^2$ . Dans les circuits de contrôle pour l'adjonction des appareils de commande, ainsi que dans les chaînes du téléguidage et de la communication est acceptable d'utiliser des câbles flexibles avec du fil de cuivre de section inférieure à  $2,5 \text{ mm}^2$ , à condition que ces conducteurs ne portent pas la charge mécanique.

Le câblage externe de la grue on effectue par le câble souple avec du fil de cuivre dans l'isolation en caoutchouc ou en équivalent, conçu pour le travail dans un intervalle de température de  $-40$  à  $+40^\circ\text{C}$ . Pour le câblage à l'intérieur des armoires des contrôleurs magnétiques et dans les cabines on utilise les fils monobrins et multibrins (ПІР, ПІГ, ПІВ-ХЛ, ПІГ-ХЛ) ou les câbles pour le câblage extérieur.

**17.3.15 Tambours de câble.** L'énergie électrique est fournie par le circuit extérieur à l'équipement électrique de la grue sur le câble. La longueur du câble, qui relie l'interrupteur d'introduction sur le châssis de la grue à tour avec l'armoire électrique est généralement égale à 50 m.

Pour la protection du câble contre l'usure et des ruptures lors de frottement aux irrégularités de la voie de roulement on utilise divers moyens. En cas de la longueur de la voie plus de 50 m on place l'armoire électrique au milieu de la voie de roulement, et pour le câble on arrange le plateau en bois sur lequel la grue traîne le câble. À la longueur de 50 et moins metres on tend un fil ou une corde sur les comptoirs le long de la voie de roulement, et à l'aide des anneaux de fil on fixe à ceux-ci le câble.



**Figure 17.13** – Tambour de câble

L'application d'un tambour de câble (fig. 17.13) délivre de la nécessité d'accomplir ces installations complexes et incertaines. Le tambour de câble est conçu pour enrouler (ou dérouler) le câble lors du déplacement de la grue sur la voie ferrée. Le tambour représente le cylindre creux, à l'intérieur duquel est placé une prise de courant circulaire reliant le câble à l'interrupteur d'introduction.

Le câble s'enroule à la surface cylindrique du tambour. Le tambour de câble s'affermite sur les constructions métalliques de la grue et il a une installation d'entraînement à l'aide de laquelle il y a un enroulement du câble sur le tambour au mouvement de la grue vers l'armoire électrique. Le câble déroule du tambour aux frais de la tension personnelle ou à la suite du changement du sens de rotation de l'entraînement du tambour.

## 17.4 Entraînement électrique des grues de chantier

L'entraînement électrique des mécanismes exécutifs des MLT est utilisé sur les grues automotrices sur chenilles et sur pneumatiques, ainsi que sur les grues mobile et les grues à tour.

Sur les grues de chantier la plus grande application a reçu l'entraînement électrique multimoteur à courant alternatif et à courant continu. Et en outre le courant électrique est souvent produite par un groupe-moteur personnel et entre du générateur synchrone vers les électromoteurs des mécanismes exécutifs. Les schémas électriques d'entraînement de grues de chantier prévoient des possibilités d'alimentation des moteurs électriques pas seulement de l'alternateur, mais aussi du réseau extérieur de courant triphasé de tension 380 V. Alimentation du réseau extérieur se réalise par un câble, qui donne la possibilité de transmettre de l'électricité par un prise de courant électrique circulaire au panneau de commande dans les grues avec l'entraînement à courant alternatif. Dans les grues avec l'entraînement à courant continu du réseau extérieur le courant est amené à l'électromoteur du courant alternatif, qui tourne le générateur de courant continu.

Nous examinerons à titre d'exemple le schéma électrique de la grue КБ-401А [45]. La figure 17.14 montre le schéma électrique des chaînes de force de la grue, la figure 17.15 – le schéma des circuits de commande, et la figure 17.16 – le schéma des chaînes d'éclairage, de chauffage et d'alarme.

L'entraînement électrique de la grue КБ-401А (fig. 17.14) est alimenté du réseau extérieur triphasé à courant alternatif avec une tension composée de 380 V et un fil de neutre. Le schéma électrique du circuit de commande (fig. 17.15) fonctionne à courant alternatif de 220 V et le courant continu du redresseur V2. Les dispositifs auxiliaires (éclairage, chauffage, alarme) se nourrissent de courant alternatif 220V (fig. 17.16). Le circuit électrique de l'éclairage de réparation fonctionne à courant alternatif de la tension 12V d'un transformateur abaisseur T2 (fig. 17.16).

L'alimentation des moteurs électriques (voir figure 17.14) est réalisée par l'interrupteur d'introduction  $Q$ , l'interrupteurs automatiques  $F1$ , les contacts du conjoncteur linéaire  $K/I$  et les contacts des conjoncteurs du réverseur.

La fréquence de rotation de tous les moteurs pendant la mise en marche on règle par le changement de la résistance des rhéostats de démarrage et de régulation. La fréquence de rotation de la commande électrique du crémaillière on règle en supplément au moyen du frein auxiliaire avec l'électro-aimant  $V2$ , qui fait ralentir le mécanisme dans la première position de la manivelle du dispositif de commande. Pour les plus petites vitesses de levage on utilise l'entraînement avec une machine de freinage à courant alternatif et un blocage dynamique de l'électromoteur de transmission.

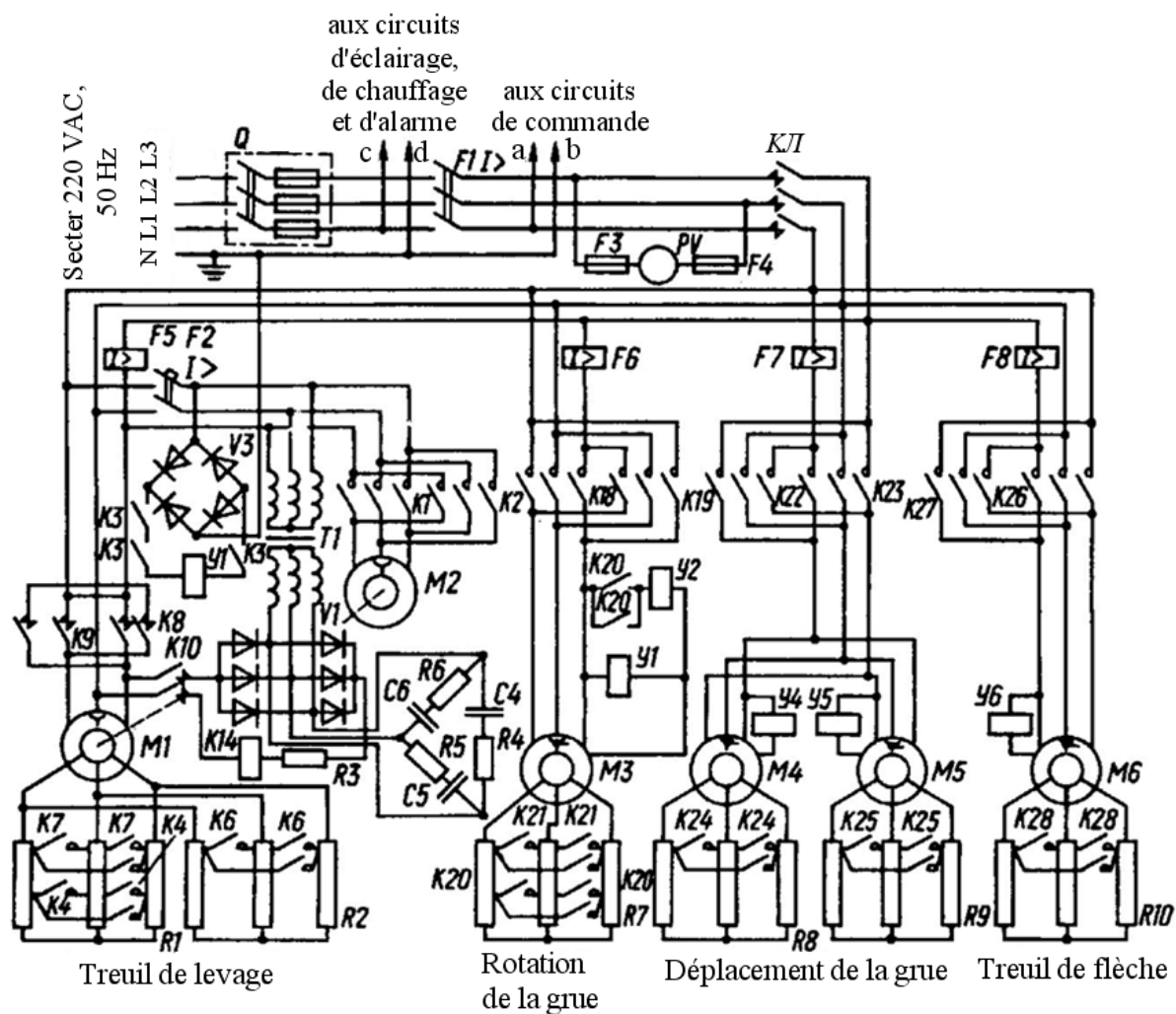
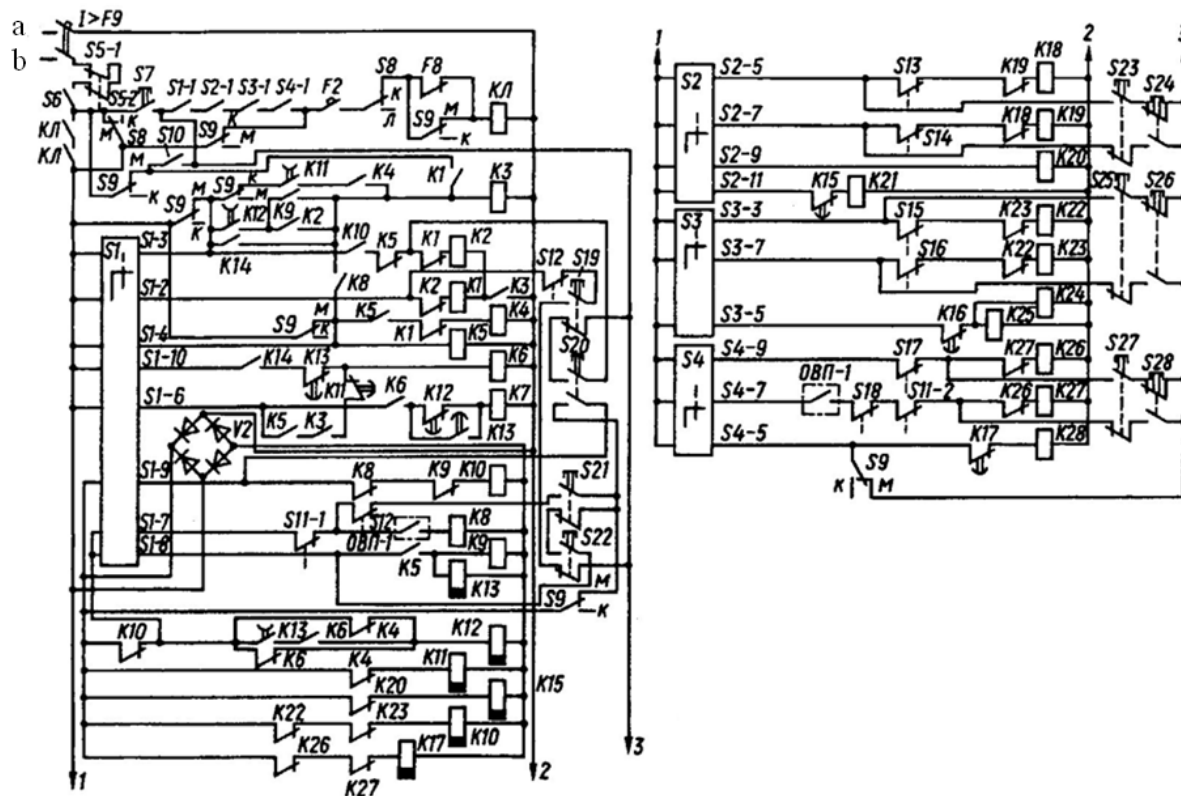
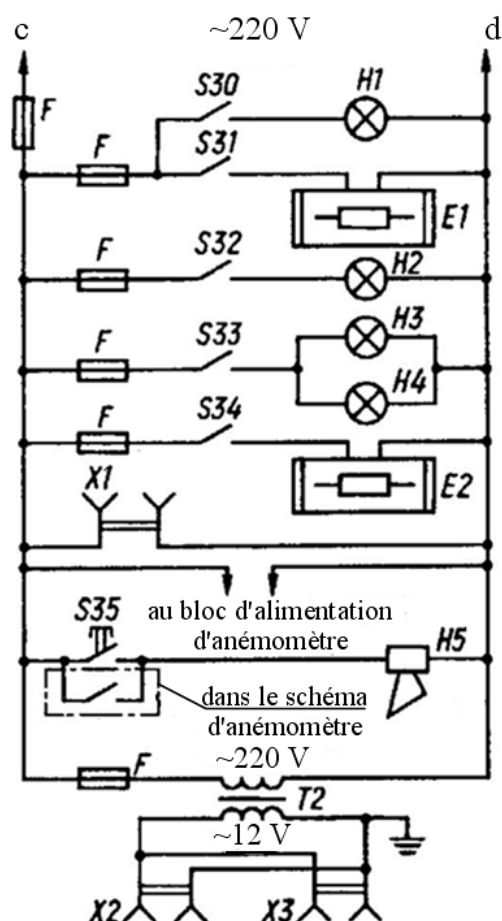


Figure 17.14 – Schéma des chaînes de force de la grue KB-401A





**Figure 17.16** – Schéma des chaînes d'éclairage, de chauffage et d'alarme de la grue KB-401A

Dans l'entraînement électrique du mécanisme de levage de la grue KB-401K on prévoit la protection des redresseurs à silicium avec électro-aimant *V1* du courant continu.

La protection des redresseurs contre la surtension est assurée par trois chaînes, dont chacun contient successivement insérées les résistances (*R4*, *R5*, *R6*) et les condensateurs (*C4*, *C5*, *C6*), joint par le triangle et inséré à trois phases de redresseur en point *V1*.

L'électro-aimant principal du courant continu se nourrit des chaînes de force selon le schéma spécial dans le redresseur *V3* et les contacts du conjoncteur *K3*.

Dans les l'entraînement électrique de tous les mécanismes est appliqués les contrôleurs magnétiques, dont commander on peut ou à partir de la cabine de la grue, ou à partir du pupitre portatif.

Au cours des travaux, la commande est effectuée à partir de la cabine au moyen des combinaturs de commande *S1*, *S2*, *S3*, *S4*. La séquence de fermeture des contacts est présenté dans les tableaux 17.1 – 17.3, où le contact fermé est marquée par le signe « X ».

**Tableau 17.1** – Fermeture des contacts de combinatuer de commande de treuil de levage de la grue KB-401A

Contact	Position de la manivelle						
	Levage			0	Abaissement		
	3	2	1		1	2	3
S1-1				X			
S1-2			X				
S1-3					X	X	X
S1-4	X	X	X				X
S1-6	X						X
S1-7	X	X	X				
S1-8							X
S1-9					X	X	
S1-10	X				X		



**Tableau 17.2** – Fermeture des contacts de combinatuer de commande de mecanisme de pivotement de la grue KB-401A

Contact	Position de la manivelle						
	Levage			0	Abaissement		
	3	2	1		1	2	3
S2-2				X			
S2-5	X	X	X				
S2-7					X	X	X
S2-9	X	X				X	X
S2-11	X						X

**Tableau 17.3** – Fermeture des contacts de combinatuer de commande de déplacement et de levage de la flèche de grue KB-401A

Contacts du contrôleur de commande		Position de la manivelle				
		En avant Levage		0	En arrière Abaissemen	
					1	2
S3	S4	2	1			
S3-1	S4-1			X		
S3-5	S4-5	X				X
S3-7	S4-7				X	X
S3-9	S4-9	X	X			

En cas du montage de la gruet et son essai, quand le mécanicien ne peut pas se trouver dans la cabine, on commande par les mécanismes à l'aide de pupitre portatif par les boutons *S19 ... S28*. Le transfert de la gestion sur la cabine ou sur le pupitre portatif est accomplie par le commutateur universel *S9*, dont la manivelle on établisce à la position *K* (la gestion de la grue de la cabine) ou à la position *M* (la gestion du pupitre portatif).

Dans les schémas d'entraînement électrique des mécanismes de la grue on assure l'accélération en gradins du moteur sous le contrôle des relais de temps. Lors de ce cycle les gradins des rhéostats de démarrage et de régulation court-circuite conformément à durée de la temporisation du relais temporisé. Par exemple, si vous installez la manivelle du combinatuer de commande *S4* immédiatement dans la deuxième position de levage (abaissement), alors d'abord s'allume contacteur du réverseur *K26 (K27)* et le moteur démarre avec la résistance complète du rhéostat. Simultanément s'éteint relais temporisé *K17*. Quand s'achèvera l'extrait du temps, le relais *K17* se déclenche et par ses contacts fermera le circuit de la bobine *K28*. Contacteur *K28* s'allume et court-circuite rhéostat, ayant laissé dans la chaîne du rotor du moteur *M6* une petite résistance.

Les moteurs, les appareils électriques et les mécanismes de la grue sont protégés par les interrupteurs automatiques, les relais à maximum de courant, par les fusibles et les disjoncteurs (voir la figure 17.14).

La protection du neutre est accomplie par les contacts des combinatuers de



commande *S1-1*, *S2-1*, *S3-1*, *S4-1*, qui sont fermés seulement dans la position nulle des manivelles. Ces contacts sont insérés en série avec le bouton *S7* dans la chaîne de la bobine du conjoncteur linéaire *KЛ*.

Les électromoteurs des mécanismes de grue sont protégés contre la surtension au moyen des relais à maximum de courant. Les bobines du relais *F5*, *F6*, *F7* et *F8* sont insérées dans une phase d'alimentation d'entraînement électrique de chaque mécanisme. Les relais sont unis dans un bloc et agissent sur le contact commun *F8* inséré dans la chaîne de la bobine du conjoncteur linéaire *KЛ*. Le fonctionnement de n'importe quel relais conditionne la rupture de la chaîne de la bobine et l'arrêt de la chaîne de force de la grue du réseau externe.

Une phase de la machine de freinage *M2* et les chaînes d'alimentation du redresseur *VI* sont protégées aussi par le relais *F5*, tandis que les deux autres phases – par disjoncteur *F2*. Le troisième pôle du disjoncteur est inséré dans la chaîne de la bobine du conjoncteur linéaire *KЛ*. C'est pourquoi, en cas du fonctionnement du disjoncteur le conjoncteur linéaire est coupé.

La protection de la chaîne d'alimentation commune contre le court-circuit est réalisée par le conjoncteur-disjoncteur et les fusibles de la boîte de force d'introduction *Q*. La protection finale contre le passage par les mécanismes de la grue des positions extrêmes est accomplie par les interrupteurs de fin de course, dont les contacts de coupure sont insérés dans les chaînes des bobines des conjoncteurs correspondants.

L'interrupteur de fin de course *S11* est ouvert, quand la suspension de crochet s'approche à la flèche. L'interrupteur de fin de course *S13* est ouvert dans la position extrême droite de la plate-forme tournante, et *S14* – dans sa gauche position extrême. Le contact *S15* de l'interrupteur de fin de course du déplacement de la grue est ouvert dans la position extrême pendant le mouvement de la grue en avant, et le contact *S16* du même interrupteur – dans la position extrême pendant le mouvement de la grue en arrière. Les interrupteurs de fin de course *S17* et *S18* coupent l'électromoteur du treuil de flèche respectivement dans les dispositions l'extrême supérieur et l'extrême inférieur de la flèche.

Le travail du treuil de levage est contrôlé par limiteur de charge *OBП-1*, dont le contact de sortie est inséré dans la chaîne de la bobine *K8*. En cas de la rupture du contact (à la suite de dépassement de capacité de charge) le contacteur de soulèvement de charge s'éteint et le circuit offre la possibilité de réaliser une opération d'abaissement de la charge. En cas de la rupture du contact (à la suite de l'excès de la capacité de charge) le conjoncteur de levage de la charge est coupé et schéma électrique donne la possibilité d'accomplir l'opération de l'abaissement de la charge.

S'il faut d'urgence arrêter tous les mécanismes de grue, on peut couper le conjoncteur linéaire par l'interrupteur d'avarie *S6* dans la cabine ou par l'interrupteur *S10* sur le pupitre portatif.

Dans les chaînes d'éclairage, de chauffage et d'alarme (fig. 17.13) la lampe *H1* de l'éclairage de la cabine de conduite et les lampes *H2*, *H3*, *H4* des projecteurs de l'éclairage de la zone de travail sont dirigés par les interrupteurs à paquet *S30–S34*. La cabine est chauffée par les réchauds *E2*. Les réchauffeurs tubulaires *E1* servent pour le chauffage de la lanterne de cabine.

La sirène sonore *H5* est activé par le bouton *S35* et par le contact d'interruption du relais de sortie de l'anémomètre. Lors de la normale charges de vent et bon état du schéma de l'anémomètre son relais de sortie est inséré et le contact dans la chaîne de la sirène est ouvert. En cas du débranchement du relais de sortie de l'anémomètre (à la suite du renforcement du vent ou de la panne dans le schéma de l'anémomètre) le contact se ferme et insère la sirène.

Aux chaînes de l'éclairage est connecté le bloc d'alimentation d'anémomètre et le transformateur *T2* avec les prises *X1* et *X2* pour l'insertion des lampes de l'éclairage de réparation. Les chaînes de l'éclairage, le chauffage et les systèmes d'alarme sont protégées par les fusibles.

### **Conclusions principales**

1. L'équipement électrique des MLT par destination est divisée en matériel principal (d'entraînement électrique) et en matériel auxiliaire (l'équipement de l'éclairage de travail et de réparation, de chauffage).

2. Pour l'entraînement des MLT on utilise les électromoteurs de type spécial de grue.

3. Le démarrage et le débranchement des électromoteurs des MLT se réalise par les appareils spéciaux : les démarreurs et les conjoncteurs.

4. Pour la protection des équipements électriques contre les régimes d'avarie on applique les fusibles, les relais thermiques et les relais à maximum de courant.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Quel équipement appartient au matériel de levage et de transport (MLT) et par quelles particularités est caractérisé son travail ?

2. Caractérisez du matériel électrique principal des MLT ?

3. Citez les exemples du matériel électrique auxiliaire des MLT ?

4. Caractérisez les électromoteurs asynchrones des grues ?

5. Comment on réalise la mise en marche des électromoteurs asynchrones des MLT ?

6. Caractérisez les moteurs à courant continu des grues ?

7. Caractérisez la destination et les particularités des éléments principaux de l'équipement de commande d'entraînement électrique des MLT ?

8. Expliquez le principe du travail du relais temporisé de courant continu ?

9. Expliquez le principe du travail du relais à maximum de courant ?

10. Expliquez le principe du travail du relais à minimum de courant ?

11. Expliquez le principe du travail du relais thermique ?

12. Expliquez la destination des éléments principaux des chaînes de force de la grue KB-401A ?

13. Expliquez la destination des éléments principaux des circuits de commande de la grue KB-401A ?

## Chapitre 18 : OUTILS ÉLECTRIQUES À MAIN

**Notions clés :** machine électroportative à main, *f* ; classe d'isolants, *f* ; électromécanisme combiné, *m* ; vibreur, *m*.

### 18.1 Informations de base

Dans l'industrie de la construction et sur les chantiers on applique de divers mécanismes et des machines électroportatives à main équipées d'entraînement électrique. Par la même machine à l'application des divers instruments de travail standard ou spéciaux ou les emmanchements spécialisés on peut accomplir diverses opérations technologiques et usiner divers matériaux, c'est pourquoi on peut diviser les machines électroportatives à main selon sa destination principale en groupes suivants : les perceuses ; les machines à polir et à meuler ; les machines pour le débitage du bois ; les visseuses ; les machines de l'action de choc ; les vibreurs.

Les outils électriques à main sont entraînées par un moteur électrique ou un électro-aimant, qui forment une unité complète avec la machine. À titre des moteurs sont appliqués :

- les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil de la fréquence du courant normale et augmentée ;
- les machines asynchrones monophasés à cage d'écureuil de la fréquence du courant normale et augmentée ;
- les machines asynchrones triphasées inversées (c'est-à-dire tourne le stator et le rotor est fixé immobile) à cage d'écureuil de la fréquence du courant normale et augmentée ;
- les machines universelles à collecteur ;
- les machines électriques du mouvement de va-et-vient.

Dans les outils électriques à main, en général, sont appliqués les électromoteurs spécialement fabriqués pour eux, travaillant sur une tension 36 ou 220 V. Dans les voitures ambulantes sont utilisés aussi les moteurs d'usage général de tension 380/220 V.

Les usines, spécialisés sur la fabrication des machines électroportatives à main, appliquent les désignations suivantes conventionnelles des électromoteurs :

KH – à collecteur de la fréquence normale du courant ;

KHД – à collecteur de la fréquence normale du courant à double isolation ;

AH – asynchrone de la fréquence normale du courant ;

АП – asynchrone de la fréquence augmentée du courant.

Les chiffres, suivant les lettres, désignent le gabarit des moteurs (le diamètre et la longueur l'acier actif du stator ou d'inducteur).

En vertu de l'utilisation de main de ce groupe des mécanismes électriques l'attention particulière lors de leur élaboration a été accordée à l'isolation électrique.

## 18.2 Isolation des outils électriques à main

On produise les outils électriques à main de trois classes de l'exécution de la tension et de l'isolation :

La I-ère classe – sur la tension nominal 220 V, dont au moins une pièce métallique, disponible pour la toucher, est séparé des pièces sous tension seulement par l'isolation fonctionnelle ;

La II-ème classe – sur la tension nominal 220 V, dont tous les pièces métalliques, disponible pour les toucher, sont séparés des pièces sous tension par l'isolation renforcée ou double isolation;

La III-ème classe – sur la tension nominal 36 V.

*Les machines électriques à main de la première classe* sont dangereux en ce qui concerne la défaite de l'ouvrier par le courant électrique. Dans le processus de travail ils doivent être bien raccordé à la terre, il faut utiliser les tapis de caoutchouc et les gants diélectriques, mais de plus dans les conditions de construction on n'a pas autorisés de les exploiter partout. L'électrosécurité complète du travail avec les machines de la I-ème classe peut être assurée seulement à leur connexion au réseau par un dispositif de débranchement, qui garantit l'arrêt de la machine du réseau en cas de la fuite du courant et de court-circuit des bobinages du moteur. Le temps du fonctionnement de la protection n'est pas plus de 0,05 s.

*Les machines électriques à main de la deuxième classe* (à double isolation) – sont plus progressifs, puisque on peut les alimenter du réseau d'éclairage, il ne faut pas les mettre à la terre, et on assure de plus l'électrosécurité absolue du travail à l'observation des règles de service. L'isolation double des machines est réalisée par deux moyens principaux :

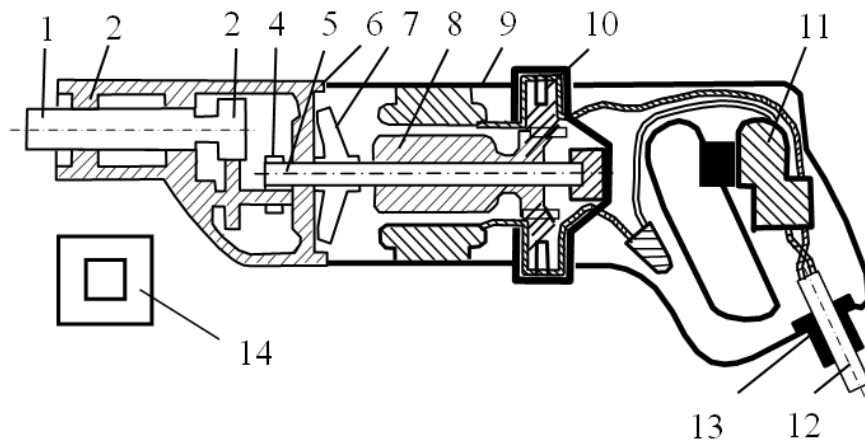
le stator du moteur (inducteur avec des bobines), le mécanisme du balai, l'interrupteur et de tous les fils de connexion sont placés dans le corps et poignée en matériau isolant (plastique de haute résistance), et l'arbre de rotor (ancrer) a un manchon qui l'isole de rotor (ancrer) et de collecteur (fig. 18.1);

le stator du moteur (inducteur avec des bobines), le mécanisme du balai, l'interrupteur et de tous les fils de connexion sont placés dans un corps en plastique ou en aluminium, qui est monté dans un boîtier en plastique. Au boîtier sont fixées une poignée, dans lequel est installé un interrupteur, et un conducteur du câble (en option manchon en plastique peut être placé entre le stator et le boîtier externe métallique).

L'arbre du moteur n'a pas un intermédiaire douille isolante. Au lieu de la douille comme deuxième isolés sert le pignon mené de matériau isolant (plastique, textolite). Le pignon peut avoir seulement un moyeu en matériau isolant, et une couronne en acier.

*Les machines de deuxième classe* (à double isolation) sur le boîtier ou sur la plaque signalétique ont un caractère spécial (voir la figure 18.1).

*Les machines de la troisième classe* sont sûrs dans le travail et ils doivent être alimenté par une source autonome de courant ou sur le réseau par des transformateurs ou des convertisseurs de fréquence de courant, si dans la machine est intégré un moteur à haute fréquence du courant.



**Figure 18.1** – Perforatrice électrique à main :

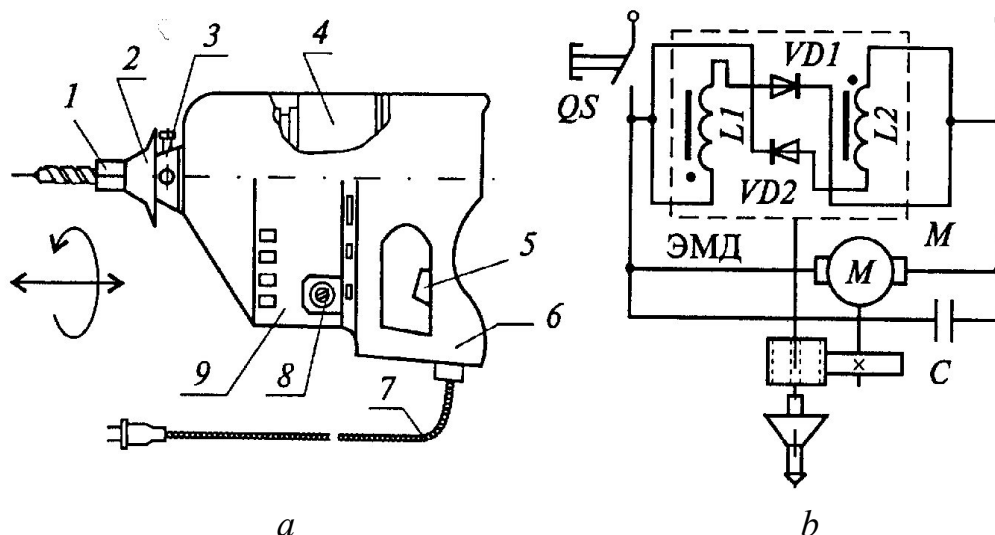
- 1 – broche ; 2 – boîtier en métal de réducteur ; 3 – réducteur ; 4 – pignon isolan ;
- 5 – arbre ; 6 – bouclier intermédiaire de plastique ; 7 – ventilateur en plastique ;
- 8 – ancre ; 9 – boîtier externe en plastique ; 10 – bouchon de porte-balais ;
- 11 – interrupteur ; 12 – câble d'alimentation ; 13 – tube flexible de protection ;
- 14 – caractère spécial sur le boîtier de machines à double isolation

### 18.3 Exemples de constitutions d'outils électriques à main

Il y a des différents modèles des outils électriques à main : perforatrices, perceuses, scies, rabots, polisseurs, mélangeurs, outils multifonction et al. Leur l'installation électrique est toujours construit sur la base des moteurs du mouvement de rotation, soit sur la base des installations moteurs de mouvement alternatif, ou représente l'électromécanisme combiné avec l'élément tournant de choc de l'action d'aller et de retour.

**18.3.1 Electromécanisme combiné.** Comme l'exemple d'un outils multifonctionne électriques à main, qui s'applique comme une perceuses et un marteaux, sert la perforatrice électromagnétique, par exemple de type ИЭ-4709Б (fig. 18.2). Cette perforatrice est connectée par le fil souple portable au réseau d'une tension de 220 V et la fréquence de 50 Hz. L'intensité du courant consommée en régime nominal fait 3,2 A, la puissance consommée – 650 W.

**18.3.2 Vibrateurs.** Les vibrateurs ce sont les simples machines de vibrations, destinées à l'excitation des hésitations mécaniques. Ils représentent les voitures qui transforment l'énergie mécanique, électrique ou chimique dans les vibrations mécaniques et transmettent ses vibrations aux matériaux et aux installations. Les fluctuations sont caractérisée par l'amplitude  $A$ , c'est-à-dire le plus grand écart par rapport à la position moyenne, mesurée en millimètres, et par la fréquence de la  $n$ , c'est-à-dire le nombre de périodes d'oscillations par unité de temps, mesurées par le nombre d'oscillations à 1 s.



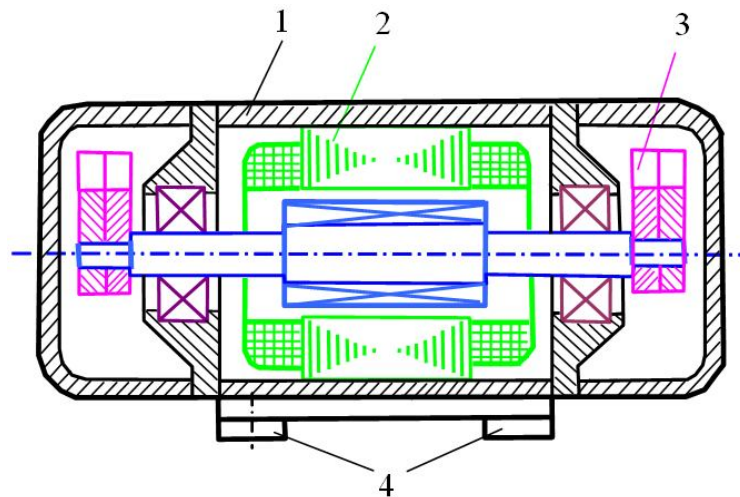
**Figure 18.2** – Perforatrice électromagnétique : *a* – constitution ; *b* – schéma électrique :  
 1 – organe de travail ; 2 – tablier de caoutchouc ; 3 – buchs ; 4 – moteur ;  
 5 – ntterrupteur de type latch ; 6 – manche ; 7 – fil ; 8 – trou ; 9 – boîtier

Une étanchéité efficace d'un mélange de béton par vibration est atteinte uniquement aux significations définies de l'amplitude et de la fréquence, à qui apparaissent de l'accélération, les forces descensionnelles de la friction intérieure entre les particules du mélange tellement qu'ils commencent à se déplacer assez l'un l'autre par gravité. On généralement utilise vibreurs à une fréquence  $n = 25-250 \text{ s}^{-1}$  et l'amplitude des oscillations 0,1–3 mm (grandes valeurs de l'amplitude pour les plus petites valeurs de fréquence).

Selon la nature de l'entraînement on subdivise les vibreurs en électromécanique, électromagnétique, pneumatique, hydraulique et à moteur, mises en marche par les moteurs à combustion interne. Les plus répandus sont les vibreurs électromécaniques à inertie avec rotation des charges déséquilibrées, fixés sur l'arbre de rotor du moteur ou sur un arbre séparé, recevant la rotation de l'électro-moteur par accouplement ou de la transmission par poulie et courroie.

**Les vibreurs de surface et d'extérieurs.** Le plus largement on utilise les vibreurs électromécaniques de type centrifuge, dont l'élément d'inertie en forme de déséquilibre ou de coureur fait le mouvement de rotation et transmet la force apparaissant centrifuge sur les roulements de l'arbre de déséquilibre ou le support de coureur.

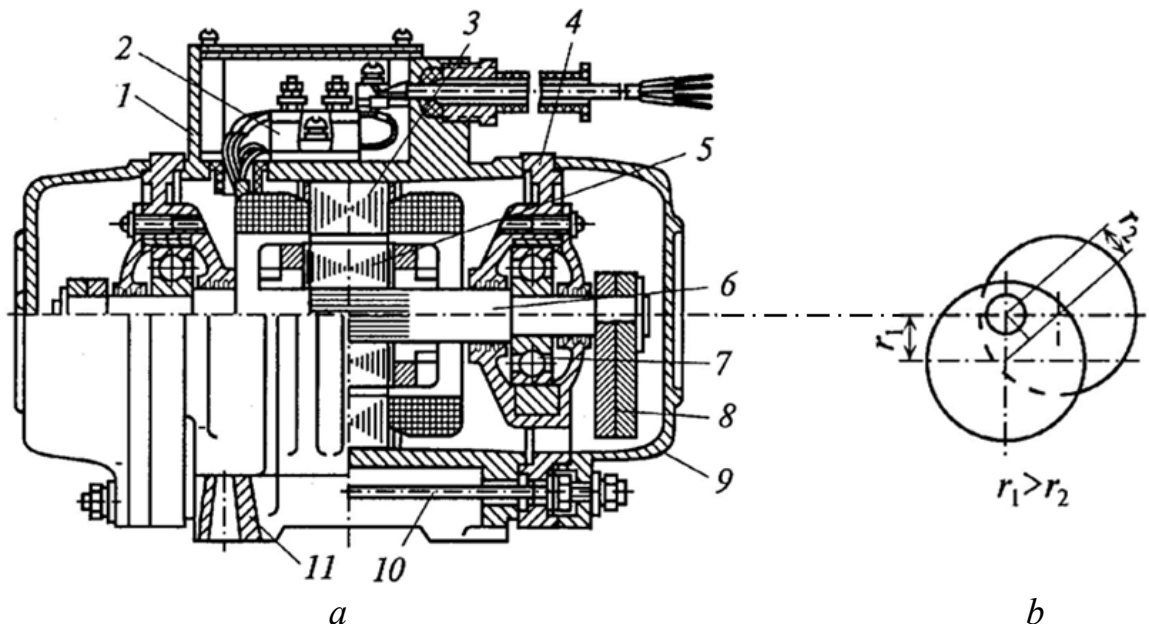
Les vibreurs électriques de surface ont les même dans la conception les mécanismes de déséquilibre vibrant à un arbre avec un moteur électrique intégrés (moteur-vibreur), stimulant des balancements circulaires. Les éléments constitutifs d'un moteur-vibreur (fig. 18.3) sont : un moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, dont sur les bouts de console de d'arbre sont fixées deux déséquilibre 3 (symétriquement par rapport au moteur) ; un boîtier d'aluminium moulé 1 avec quatre supports de fixation 4 pour la fixation à l'aide des boulons à la base, qui transmet des vibrations sur le mélange à béton.



**Figure 18.3** – Moteur vibreur

Le vibreur électromécanique IB-70 (fig. 18.4) se compose d'un corps, un électromoteur et un excitateur déséquilibré des vibrations. Dans un boîtier en aluminium 1 avec les boucliers à palier 4 on dispose un moteur asynchrone triphasé, dont aux enroulements du stator 3 le courant entre par la boîte à bornes 2, et le rotor 5 est monté sur l'arbre 6. L'arbre s'appuie sur les paliers 7 et sur les parties consoles de l'arbre sont affermis les déséquilibres 8, fermé par les couvercles 9.

Les couvercles sont serrés par les broches 10 et adhèrent étroitement au corps, dont dans la partie inférieure il y a des pattes d'installation 11 avec les orifices pour les boulons de la fixation du vibreur vers un fond en cuve, au coffrage ou d'autres éléments de la structure, à travers laquelle les vibrations sont transmises aux particules du mélange à béton.



**Figure 18.4** – Vibreur électromécanique IB-70 à un arbre et des fluctuations circulaires :  
*a* – constitution ; *b* – schéma de régulation de déséquilibre ; 1 – boîtier ; 2 – boîte à bornes ;  
 3 – enroulement du stator ; 4 – boucliers ; 5 – rotor ; 6 – arbre ; 7 – palier ; 8 – déséquilibres ;  
 9 – couvercles ; 10 – broches ; 11 – pattes d'installation

Lors d'étanchement superficielle du mélange en béton la base d'un vibreur transmet efficaces fluctuations jusqu'à une profondeur de 20 cm. Un vibreur de surface, monté sur une latte, peut servir pour l'égalisation et d'étanchement superficielle du mélange en béton sur la grande place. Le vibreur, déconnecté de la latte et de la fondation, peut être utilisé comme un vibreur externe pour le message de fluctuations au coffrage, à la goulotte, la paroi de la trémie. Il dispose de deux déséquilibres accouplés, qui représentent les pièces en acier cylindrique, affermis d'une manière excentrique sur l'arbre. Étant donné que le centre de masse du déséquilibre est déplacé par rapport à l'axe de l'arbre lors de la rotation de l'arbre et des déséquilibres apparaît une force centrifuge de l'inertie, qui communique au vibreur les hésitations obligées. La fréquence d'oscillation est égale à la fréquence de rotation des déséquilibres, et l'amplitude de l'oscillation dépend de la masse des parties vibrantes et du couple statique de la masse des déséquilibres, qui se réfère au produit de la masse des déséquilibres à l'excentricité de la masse, c'est-à-dire à une distance de l'axe de rotation au centre de masse de déséquilibre.

Étant donné que le déséquilibre extérieur dans chaque paire a quatre rainures de clavette, on peut l'établir sous de différents angles par rapport au déséquilibre intérieur, modifiant l'excentricité totale de la masse doublée du déséquilibre accouplé. Quand les axes des déséquilibres coïncident, l'excentricité de masse est le plus grand, et à l'augmentation de l'angle l'excentricité de masse diminue, puisque le centre total de la masse pour les déséquilibres écartés est au milieu de la ligne reliant les centres de masse de chacune déséquilibre, et est espacé de l'axe de rotation à une distance plus courte car la cathète du triangle rectangle est plus petite que l'hypoténuse. En conséquence le moment statique de la masse des déséquilibres diminue et la force motrice qu'ils provoquent diminue aussi.

Le vibreur série ИВ-70 à la fréquence de  $2800 \text{ min}^{-1}$  et le réglage approprié des déséquilibres externes génère une force motrice égale à 2 ; 2,5 ; 3,15 et 4 kH. L'alimentation de l'électromoteur et réalisé du réseau du courant alternatif triphasé de la tension 220/380 V et la fréquence de 50 Hz. La puissance de l'électromoteur est 0,4 kW, la masse du vibreur – 20 kg. Au service direct du vibreur, par exemple à l'étanchement superficiel du mélange en béton, la tension 220/380 V présente un grand danger pour le personnel. Dans ce cas on utilise le vibreur analogue selon l'installation ИВ-68, qui développe à la fréquence  $1400 \text{ min}^{-1}$  la force motrice de 5 kN et dont l'électromoteur est alimenté par une tension de 36 V du transformateur abaisseur.

Les vibreurs externes fixent au coffrage, aux goulottes, aux trémies. Leurs électromoteurs sont alimentés du courant directement du réseau de 220/380 V et ne nécessitent pas les abaisseurs de tension, ce qui est particulièrement confortable à l'utilisation d'un grand nombre des vibreurs.

**Les vibreurs internes (de profondeur)** servent à compacter le mélange à béton dans la fabrication de grands éléments de construction préfabriqués, saturés par armature, ainsi que dans la construction de structures en béton armé monolithiques. Leur travail est très efficace, puisque le corps de vibreur agit



directement sur le mélange à béton. Les vibrateurs internes sont fabriqués avec un électromoteur intégré qui fait tourner l'arbre du déséquilibre dans le corps, et avec un électromoteur imposé, qui transmet la rotation à l'élément vibrant à travers de l'arbre flexible.

#### **18.4 Entretien et réparation d'outils électriques à main**

Les normes de sécurité de fonctionnement des machines électriques, ainsi que la réparation et l'essai après la réparation sont communs à tous les types de machines et de l'équipement électrique. Cependant, il y a des exigences supplémentaires imposées aux outils électriques à main, en particulier aux machines à double isolation (de classe II) :

- les outils électriques à main (en dehors du temps de travail) doit être stocké dans les pièces sèches et chauffées ;
- il faut organiser l'enregistrement du temps de travail des outils ;
- lors de la délivrance de la machine au travail, il faut l'inspecter, vérifier à vide la clarté de fonctionnement de l'interrupteur, ainsi que le bon état de la résistance d'isolement par mégohmmètre de 500 V à l'interrupteur allumé ;
- il est interdit de élvirer au travail une machine, ainsi qu'il est nécessaire d'arrêter le travail dans les cas de la détection des fissures sur les détails de corps et de manche, les endommagements des couvercles de porte-balais, mauvais travail de l'interrupteur, les endommagements du câble ou son tube protecteur, du feu circulaire sur le collecteur, de la fumée ou l'odeur caractéristique de l'isolation brûlant ;
- il est interdit de travailler dans les locaux avec environnement explosif ou chimiquement actif détruisant l'isolation, ainsi que sur les terrains ouverts pendant la chute des précipitations (la pluie, la neige) ;
- l'opérateur doit respecter la durée maximale admissible du travail et ne pas admettre les surcharges, au-dessus d'indiqué au passeport, ainsi que ne pas soumettre la voiture aux coups. Il faut avoir en vue qu'à l'augmentation de la charge au-dessus de charge à passeport sur une machine avec un moteur asynchrone, ayant la caractéristique rigide, il se renversera (s'arrêtera), que provoquera en fin de compte la combustion prématurée du bobinage. Le moteur à bagues a la caractéristique non rigide, c'est pourquoi il réduira la vitesse. Ce qui augmente la consommation d'énergie en conséquence le moteur sera surchauffé au-dessus de la norme admissible, et la productivité baissera, car la vitesse de la broche ne sera pas optimal ;
- il est nécessaire de suivre la température du corps du moteur, qui ne doit pas excéder 60 °C (pratiquement, si la paume de la main ne subit pas l'attouchement vers le corps du moteur, il a été surchauffé au-dessus de la norme) ;
- chaque jour après la fin du travail de la machine il faut nettoyer des pollutions, a resserrer en cas de nécessité les détails fixatifs.

Lors de l'exploitation des outils à main à double isolation, il faut se rappeler que :

- ils ne devraient pas être mis à la terre ;
- il n'y a pas besoin d'utiliser des équipements de protection individuelle (des tapis en caoutchouc, gants isolants) ;
- il est permis de travailler dans des zones intérieures et extérieures avec plancher de la terre, du béton, de l'asphalte, du métal, du bois et d'autres, ainsi que sur les structures métalliques, dans les chaudières, les tubes, etc. ;
- on peut utiliser les machines à la température de - 35 °C jusqu'à + 35 °C et l'humidité relative jusqu'à 90 % à la température +20 °C ;
- toutes les 50 heures d'utilisation, il est recommandé de nettoyer le collecteur et le porte-balais de la poussière de charbon accumulée, souffler la machine à l'air comprimé sous la pression jusqu'à 0,15 mPa ;
- il est nécessaire périodiquement effectuer un contrôle de la machine. Le contrôle des outils à main à double isolation il est nécessaire de passer par chacun 100 heures de fonctionnement, mais au moins une fois tous les trois mois. Le contrôle est aussi nécessaire à chaque changement des balais.

Lors du contrôle on démonte la machine à double isolation et :

- on éloigne la poussière conductrice accumulée par l'air comprimé à la pression jusqu'à 0,15 mPa, on essuie les surface isolantes par la serviette technique mouillée dans la benzine, on contrôle par le mégohmmètre l'isolation ouvrière et supplémentaire (résistance de chacun d'entre eux doit pas être inférieure à 2 mégohms) ;
- on examine les détails de corps, le câble d'alimentation et le bouchon de la connexion ;
- après l'assemblage de la machine on réalise un essai de la résistance d'isolation de la machine à l'interrupteur inséré par une tension 2500 V, la fréquence de 50 Hz pendant 1 min sur l'installation de haute tension, par exemple par l'appareil VIIY-1M (les électrodes à l'essai mettent à un des contacts de la la prise et vers les détails métalliques de la machine disponible pour toucher au temps de travail) ;
- si au contrôle de la machine on découvre quelques défauts, elle doit être remise à la réparation.

On fait la réparation des voitures seulement dans l'atelier spécialisé par le personnel préparé pour cela. Après la réparation chaque machine est soumis aux dans les conditions de laboratoire.

## **Conclusions principales**

1. Les outils électriques à main sont entraînées par un moteur électrique ou un électro-aimant, qui forment une unité complète avec la machine.

2. Dans les outils électriques à main sont appliqués électromoteurs de la destination spéciale qui fonctionnent à la tension 36 V ou 220 V. Dans les machines mobiles on utilise aussi les électromoteurs d'usage général sur la tension de 380/220 V.

3. On produise les outils électriques à main de trois classes de l'exécution de la tension et de l'isolation.

4. Le matériel électrique de force des outils électriques à main est construit ou à la base seulement des moteurs du mouvement de rotation, ou seulement sur la base des installations d'aller et de retour, soit représente l'électromécanisme combiné avec l'élément tournant et de choc de l'action d'aller et de retour.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Énumérez, quels types des mécanismes et des outils à main, équipés d'entraînement électrique, s'appliquent dans l'industrie de la construction ?

2. Caractérisez les types des électromoteurs appliqués dans les outiles électriques à main. Quelles sont les particularités de leur marquage ?

3. Quelles sont les classes de la tension et de l'isolation des outiles électriques à main ?

4. Caractérisez les particularités de l'isolation des machines électriques à main de la première classe. Quelles sont les normes de sécurité de leurs fonctionnement ?

5. Caractérisez les particularités de l'isolation des machines électriques à main de la deuxième classe. Quelles sont les normes de sécurité de leurs fonctionnement ?

6. Caractérisez les particularités de l'isolation des machines électriques à main de la troisième classe. Quelles sont les normes de sécurité de leurs fonctionnement ?

7. Expliquez la conception de la perforatrice électrique à main ?

8. Expliquez le schéma de perforatrice électromagnétique ?

9. Donnez la caractéristique aux vibrateurs. Quelles sont leurs types et la destination ?

10. Par quelles particularités se caractérisent les vibrateurs électromécaniques de type centrifuge ?

11. Expliquez la conception et le principe de fonctionnement du vibreur électromécanique IB-70.

12. Quelles sont les règles de la sécurité de fonctionnement des machines électriques à main ?

13. Quelles sont les particularités de la réparation des machines à double isolation ?

## Chapitre 19 : RECHAUFFAGE ÉLECTRIQUE DU BETON ET DU SOL

**Notions clés :** rechauffage électrique, *m* (interne, périphérique, par électrodes, par induction, par les rayons infrarouges), traitement à vapeur, *m*.

Sur le traitement thermique du béton est perdu environ 70% du temps nécessaire à la fabrication de produits en béton. C'est pourquoi en pratique on applique de diverses méthodes du traitement thermique du béton, qui assurent la réduction du temps sur cette opération. Une de ces techniques est le rechauffage électrique comme dans le processus de formation d'un mélange de béton, ainsi que pendant sa présence sous les formes. En présence de l'électrochauffe préalable du mélange à béton et des formes le temps du traitement thermique du béton peut être beaucoup réduit jusqu'à quelques heures.

### 19.1 Rechauffage électrique du béton

Il y a quelques méthodes de l'électrotraitement thermique du béton.

***Rechauffage interne par électrodes*** – on place les électrodes verticalement à l'épaisseur du béton. Cette méthode est appliquée pour les fondations préfabriquées et monolithiques, les murs, les blocs.

***Réchauffage périphérique par électrodes*** – les électrodes sont fixées dans le coffrage dans les écrans spéciaux ou dans la couche thermoactive des sciures mouillées avec la solution du chlorure de sodium (NaCl). On l'applique pour le réchauffage unilatéral des structures par l'épaisseur plus de 20 cm ou bilatéral – jusqu'à 20 cm.

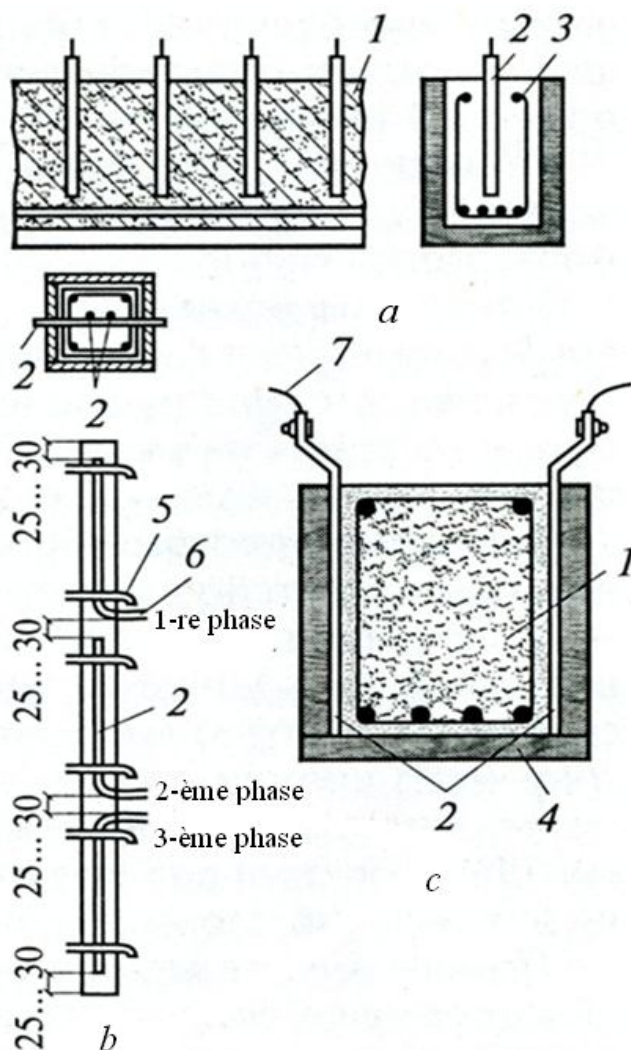
***Réchauffage par induction*** – la pièce se place au champ magnétique variable formé par un bobinage électrique, et se chauffe par les courants de Foucault. Cette méthode est appliquée à la chauffe des structures préfabriquées et monolithiques : colonnes, poutres, croisées, troncs, tubes, etc.

***Rechauffage infrarouge par les réchauffeurs à hautes températures*** à l'aide des lampes de l'incandescence, des réchauffeurs tubulaires, de fil et d'autres. Cette méthode s'applique pour la chauffe des structures monolithiques de la configuration complexe et au séchage des produits.

***Rechauffage indirecte par les réchauffeurs à basses températures*** à l'aide d'autres réchauffeurs tubulaires, plats, à cordes et d'autres réchauffeurs montés dans le coffrage ou les obscurités. La méthode est appliquée pour tous les types des produits.

***Rechauffage infrarouge dans les chambres avec des surfaces rayonnées.*** La méthode est appliquée à la fabrication des dalles et les panneaux.

***Electrorechauffage du mélange à béton en dehors de la forme.*** Le mélange est placé dans la forme dans l'état chaud. La méthode est appliquée pour la construction des structures monolithiques et à la fabrication des produits en usine.



**Figure 19.1** – Chauffage du béton par électrodes :  
*a* – par des tiges électrodes ; *b* – par des cordes électrodes ;  
*c* – électrodes à plaque ; 1 – béton ; 2 – électrodes ;  
 3 – armature ; 4 – coffrage ; 5 – crochets ; 6 – connexion  
 des électrodes pour le réseau d'alimentation ; 7 – fil  
 d'alimentation

l'épaisseur du produit. Les électrodes à cordes sont fixées le long de l'axe des structures longues. Les distances entre les électrodes se mettent conformément à la figure 19.1

En hiver le rechauffage électrique du béton est particulièrement important. La congélation du béton dans le processus твердения réduit sa solidité. Lors de l'obtention par béton 50– 60 % de la solidité la congélation n'influence pas sur la solidité finale du béton. À partir de cela on choisit le mode de rechauffage.

Le mode de longue durée est appliqué pour les structures massives, le mode accéléré – pour les structures facilitées, le mode intermédiaire – pour les autres structures.

En outre on utilise : le mode étagé avec quelques degrés isothermiques (est appliqué pour les structures monolithiques et démontables préalablement chargées) ; le mode « isothermique réchauffage et refroidissement », dont le

La rechauffe par les électrode peut être produite seulement par le courant alternatif, puisque le courant continu provoque les réactions chimiques irréversibles changeant la structure du béton. La résistance du béton dépend de sa résistance spécifique, les surfaces du contact avec le béton et les distances entre les électrodes. La conductibilité électrique du béton, qui dépend du contenu de l'humidité dans béton, diminue pendant la solidification du béton. Pour maintenir de la dissipation thermique calculée on introduit dans le béton de diverses additions ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ), accélérant la solidification et diminuant la résistance électrique du béton.

Pour rechauffage on applique les différents types d'électrodes : à plaques, en bandes, à tiges et à cordes (fig. 19.1).

Pour deux premiers types on applique l'acier de toit, pour les autres – les barres de diamètre 5–12 mm. Les électrodes à plaque font en forme des plaques, qui entièrement ou partiellement ferment les surfaces opposées de

rechauffage se réalise selon la méthode d'électro réchauffage en dehors de la forme (est appliqué pour les structures monolithiques) ; le mode autorégulateur avec le courant de la tension constante (pour les structures massives) ; le mode d'impulsion avec alternance désactivation de courant. La température maximale du procès est limitée par finalement admissible pour la marque définie du béton (d'habitude 40–80°C).

Rechauffage électrique du béton est produit à l'aide des transformateurs spéciaux triphasés avec le refroidissement d'huile et le réglage de la tension échelonnée.

À côté des transformateurs triphasés on peut utiliser les transformateurs monophasés, y compris les transformateurs de soudure, connectés par les groupes triphasés. Les transformateurs de soudure sont conçues pour le mode cadencé et leur charge continue au réchauffage doit faire 60–70 % du réchauffage nominale.

Le câblage électrique des transformateurs abaisseurs jusqu'à la place de l'électrochauffe on accomplit seulement par les fils isolés avec la fixation sur les supports en bois, sur les isolateurs ou sur les supports spéciaux portables. Pour éviter les pertes dans les lignes les transformateurs doivent s'installer le plus près possible vers les électrodes dans la place de la chauffe du béton. Les contacts des fils communicateurs avec les électrodes et avec d'autres fils sont assurés avec l'aide des boulons ou les bornes démontables. Pour éviter les pertes dans les lignes, il faut installer les transformateurs le plus près possible vers les électrodes de la place du réchauffage du béton. Les contacts des fils communicateurs avec les électrodes et avec d'autres fils sont assurés à l'aide des boulons ou des bornes démontables.

Avant de commutation au réseau secondaire du transformateur on fait le contrôle en régime de la marche à vide et la possibilité du réglage de la tension secondaire. Au cours de travail il faut contrôler à l'aide des ampèremètres ou des tenailles de mesure l'uniformité de la charge des phases.

Pendant la solidification du béton sa résistance électrique diminue. Pour le maintien du courant il faut diminuer la tension de sortie du transformateur.

Le mesurage de la température du béton au cours du chauffage électrique on produise par les thermomètres dans les trous faits à l'avance, pas moins trois dans chaque élément constructif. À premier 5–6 heures on mesure la température dans chaque heure, au 18 heures suivant – par 2 heures et dans l'autre temps – 2 fois au remplacement.

Pour rechauffage électrotrique du béton, le briquetage, les surfaces plâtrées on utilise les sources extérieures de la chaleur.

L'électrochauffe des produits avec l'utilisation des sources extérieures de la chaleur, à la différence du rechauffage par électrode, se passe aux frais de la chaleur, qui se détache en dehors de la structure et est transmis au béton par le matériel intermédiaire (les sciures, l'eau, l'air, la vapeur, les murs métalliques) ou aux frais de la radiation. Puisque rechauffage extérieur est moins effectif que le rechauffage par électrodes, on lui applique seulement pour les produits de la configuration complexe.

***Rechauffage du béton par les fourneaux électriques de la résistance.*** Dans les fourneaux électriques de la résistance, appliqués pour le rechauffage indirecte du béton, comme l'élément sert chauffant le fil de nichrome ou de fechr<sup>1</sup>. Un four à

---

<sup>1</sup> alliage : Cr 12—27 %) Al 3,5—5,5 % ; Si 1 % ; Mn 0,7 % ; le reste Fe.

réverbère [77] le plus simple, destiné à rechauffage électrique des produits en béton et en béton armé d'une petite épaisseur, représente la rainure en bois de la forme parabolique des planches par l'épaisseur de 40 mm.

Pour le rechauffage directe on utilise les électroécrans. L'électroécran représente la croisée des coins, dont à l'intérieur sur une feuille en acier d'épaisseur de 1 mm avec l'isolation mince est couché un fil de rechauffage en acier ou en nichrome. Par-dessus le fil est isolé par l'asbeste en feuilles et une couche du coton minéral de l'épaisseur 20–30 mm, qui est protégé par une feuille de la tôle. Dans le processus de rechauffage quelques électroécrans font partie successivement. La température du béton est réglée par l'insertion à la chaîne du différent nombre des électroécrans.

Pour le rechauffage des tubes en béton armé et les anneaux on utilise les fourneaux cylindriques avec la spirale chauffante enroulée au morceau du tube de ciment d'amiante.

***Rechauffage électrique à l'aide de la couche thermoactive.*** On couvre la structure chauffée par une couche des sciures mouillées de la solution faible du sel (3–5 %) pour l'augmentation de la conductibilité électrique. Dans les sciures on installe les électrodes de l'acier rond ou en barres, connectées au réseau. Lors de l'activation du courant les sciures se chauffent et la chaleur est transmis à la structure. Pour l'augmentation de la conductibilité électrique de sciures après le comblement on les presse un peu. La température des sciures est soutenue au niveau de 80–90°C. La puissance nécessaire pendant la montée de la température est 7–8 kW sur 1 m<sup>3</sup> du béton, et la dépense de l'énergie électrique sur la chauffe du même volume du béton atteint 120–160 kWh.

***Rechauffage à l'aide des thermoformes avec les éléments chauffants.*** Dans le processus de rechauffage électrique des produits démontables en béton armé on applique les panneaux de caoutchoucs avec conductibilité électrique. La conductibilité électrique d'un tel caoutchouc est créée aux frais d'un grand contenu dans elle de la suie. Les panneaux chauffants ont une couche moyenne conductive par l'épaisseur de 2 mm, à qui sont bouchés les électrodes du filet de laiton ou du ruban, et deux couches extérieures du caoutchouc ordinaire avec l'épaisseur de 0,5 mm. Un important avantage de ce moyen est l'hermétisation du produit en train de son rechauffage, excluant l'évaporation de béton.

***Traitement à vapeur.*** Le milieu à vapeur dans un local de vaporisation est créé à l'aide des éléments-spirales électriques chauffants ou les électrodes établies dans la partie inférieure du local. La puissance des installations chauffantes est définie du compte 7–8 kW sur 1 m<sup>3</sup> des produits chauffés. Vers les réchauffeurs on connecte une tension du réseau. Pour accélérer le rechauffage du produit il est recommandé d'appliquer au lieu de l'eau 0,5 % solution du sel de cuisine. Le moyen de traitement à vapeur des produits en béton armé est appliqué pour les produits de la configuration complexe.

***Rechauffage électrique par les rayons infrarouges.*** Le rechauffage infrarouge, à la différence d'autres moyens de l'échauffement extérieur du béton, assure la transmission directe de l'énergie thermique de la source de l'irradiation vers le produit chauffé. À titre des sources de l'infrarouge on utilise les lampes de l'incandescence de la puissance de 300 et 500 W, à la tension de 127 et 220 V.

La puissance, nécessaire au chauffage électrique du béton, est un des facteurs principaux définissant le choix du matériel électrique et le calcul du réseau d'alimentation. Elle dépend de : le module de la surface de la structure chauffée : la température du chauffage : la température de l'air extérieur : la température initiale du béton ; la structure du coffrage ; l'efficacité de la protection contre le froid ; et particulièrement de la vitesse du chauffage du béton.

À titre des sources d'alimentation de chauffage électrique on applique, en général, les transformateurs. À l'électrotraitement thermique du béton pour le maintien du régime donné on applique les transformateurs avec le réglage à degrés de l'effort, les autotransformateurs et les régulateurs inducteurs. On choisisse les transformateurs selon la puissance et la tension.

On produit la sous-station de transformation de l'installation extérieure КТП-ОБ-63У1 qui est destinée au chauffage électrique du sol et du béton. Elle contient le transformateur ТМОБ-63 de la puissance nominale 63 kVA.

Le calcul approximatif de la dépense de l'énergie électrique ( $W$ ) et la puissance demandée ( $P$ ) pour chauffage électrique du béton est produit en conséquence selon les formules :

$$W = W_{c.s.} V; \text{ et } P = \rho V, \quad (19.1)$$

où :

$W_{c.s.}$  – consommation spécifique de l'énergie électrique, kWh/m<sup>3</sup> ;

$\rho$  – puissance spécifique sur 1 m<sup>3</sup> du béton, kWh/m<sup>3</sup> ;

$V$  – volume du béton, m<sup>3</sup>.

La consommation spécifique de l'énergie au chauffage électrique du béton par les divers moyens :

chauffage par électrodes 80–120 kWh/m<sup>3</sup> ;

chauffage par induction 120–150 kWh/m<sup>3</sup> ;

chauffage infrarouge 100–200 kWh/m<sup>3</sup>.

**Tableau 19.1** – Puissance spécifique pour chauffage électrique des structures en béton, kWh/m<sup>3</sup>.

Température de l'air, °C	Température de chauffage, °C	
	40	80
0	7,7...9,3/15,6...18	8,3...10,4/16,2... 19,2
-5	8,2...10,1/16,1...18,9	8,7...11,2/16,6...20
-30	8,6...10,9/16,5...19,7	9,1...12/15...25

*Remarque.* Avant la ligne oblique sont indiquées les limites de la puissance spécifique à la vitesse de l'augmentation de température de chauffage 10°C/h, après la ligne – 20°C/h.

## 19.2 Chauffage électrique du sol

Chauffage électrique du sol on applique en telle régions où il y a une puissance libre électrique (par exemple, près de puissantes usines hydroélectriques).

Il y a quelques moyens de chauffage électrique des sols, dont le plus confortable, bon marché et sûr est le moyen d'électrode avec la connexion directe



des installations de réchauffage électrique aux réseaux électriques existant de tension jusqu'à 380 V.

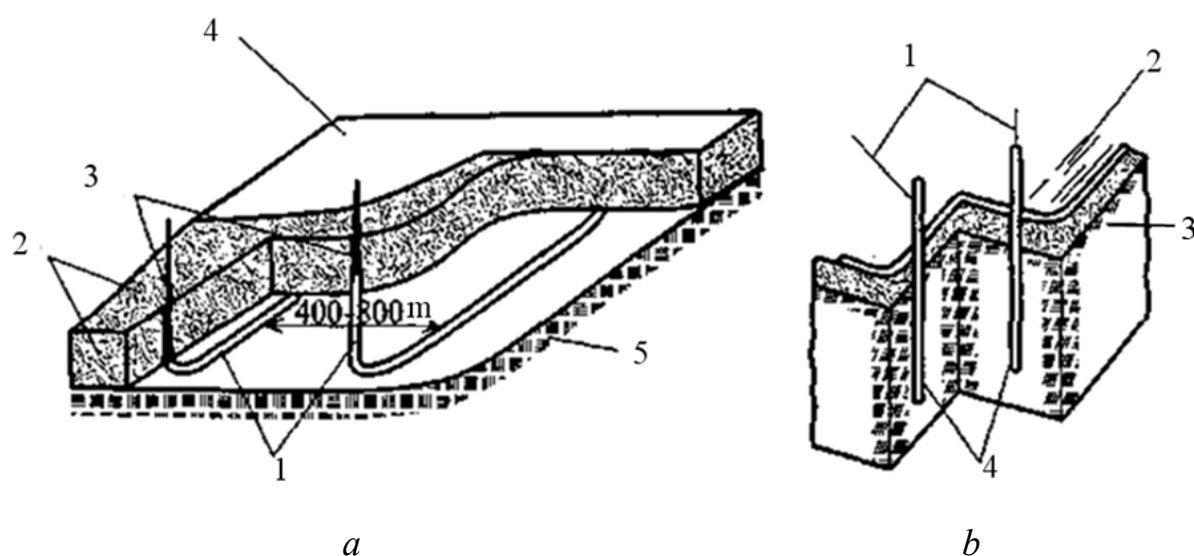
Le moyen de réchauffage par électrodes consiste en ce que par le sol passe le courant électrique de tension de 220 ou 380 V. La conductibilité électrique du sol dépend du degré de son humidité, l'état et la température, la présence dans le sol des solutions des sels, les acides, de la structure du sol, etc.

On couvre la surface du terrain du sol chauffé sur 15–25 cm par la couche des sciures mouillées avec la solution d'eau du sel (chlorure de sodium, le chlorure de calcium) ou de l'acide chlorhydrique, ayant la destination passer primordialement le courant et protéger le sol contre le froid; même à la tension de 380 V le courant pratiquement ne passe pas dans le sol gelé.

Dans le processus de réchauffage électrique du sol par les électrodes horizontales (fig. 19.2, *a*) la chaleur est transmise au sol particulièrement de la couche se chauffant des sciures, et la participation du sol dans la chaîne du courant est assez petite. Seulement la couche insignifiante supérieure du sol adhérent aux électrodes, fait partie de la chaîne électrique comme résistance, dans laquelle se détache chaudement.

Les électrodes horizontales sont appliquées en cas de réchauffage du sol sur petit profondeur (jusqu'à 0,5–0,7 m), ainsi que dans les cas où les électrodes verticales sont inapplicables en conséquence d'une petite conductibilité électrique du sol ou l'impossibilité de leur enfoncement au sol mélangé, par exemple, avec le gravillon.

Le réchauffage avec les électrodes verticales (fig. 19.2, *b*) est plus effectif et est appliqué à la profondeur du sol gelé plus de 0,7 m, ainsi en cas de petite contact entre les électrodes horizontales et le sol.



**Figure 19.2** – Réchauffage électrique du sol :

*a* – par les électrodes horizontales : 1 – électrodes ; 2 – sciures ; 3 – connexion de l'électricité ; 4 – protection supérieure contre le froid (les cartons goudronés, les obscénités etc.) ; 5 – sol ; *b* – par les électrodes verticales : 1 – connexion de l'électricité ; 2 – sciures avec protecteur contre le froid ; 3 – sol ; 4 – électrodes

Dans les sols fermes (argileux et sablonneux avec l'humidité plus de 15–20 %) on cloue les électrodes sur la profondeur 20–25 cm, et puis on fait les enterre dans la mesure du dégivrage du sol.

Au dégivrage sur la profondeur de 1,5 m il est recommandé d'avoir deux assortiments des électrodes – court et long. Dans la mesure du dégivrage du sol les électrodes courtes sont remplacées par les longs. Ayant réchauffé le sol sur la profondeur de 2 m et plus il faut produire par les degrés avec l'éloignement périodique des couches dégelant (au courant coupé).

En cas des électrodes verticales le sol est couvert par les sciures, qui servent favorisent d'abord le rechauffage de la couche supérieure du sol. Dans la mesure du dégivrage les couches du sol font partie de la chaîne, après quoi les sciures seulement diminuent la perte de chaleur du sol dégelé. Au lieu des sciures pour favoriser le rechauffage on peut utiliser les rigoles percées par le ciseau entre toutes les électrodes sur la profondeur de 6 cm et inondées de la solution du sel. À la couverture de la surface du sol réchauffé avec la couche des sciures sèches, comme montre la pratique, l'installation des rigoles donne de très bons résultats.

Aux fins de l'économie de l'énergie électrique et l'utilisation maxima de la capacité la moyenne température positive du sol chauffé ne doit pas excéder 2–5°C, et dans les points séparés – 15–20°C. Le rechauffage il faut conduire par les parcelles de terrain avec les interruptions dans leur alimentation par courant.

La puissance demandée de l'énergie électrique à la température du sol 15 °C en moyenne sur chaque mètre cube fait 3,5 kW et la dépense de l'énergie électrique – 30 kWh.

Les dernières années est élaboré et introduit dans la production en régions du nord une méthode de réchauffage du sol avec l'énergie électrique sous tension jusqu'à 10 kV. L'application pour l'électrochauffe du sol gelé des électrodes de la tension de 10 kV en comparaison de la tension de 380 V permet d'accélérer la production des travaux et réduit leur coût. La quantité requise d'électrodes diminue, et la distance entre eux augmente. On réduit le volume des travaux préparatoires de l'immersion des électrodes au sol. La quantité principale de chaleur se détache près des électrodes, l'autre partie du sol se chauffe jusqu'à la température négative proche vers 0°C aux frais de l'énergie thermique, accumulée autour des électrodes. Le sol se chauffe de bas en haut, aux frais de cela diminuent les pertes de la chaleur à l'atmosphère. La chauffe du sol gelé jusqu'à la température -1,5...-0,5 °C réunit les conditions très favorables pour son élaboration par les mécanismes de terrassement, puisque au dégivrage complet le sol gele au godet ou le versoir du bulldozer. En outre, le sol humecté, éloigné au versoir, se congèle ce que provoque les dépenses supplémentaires à son chargement aux véhicules ou à son comblement inverse.

### **19.3 Sécurité du travail au chauffage électrique**

La sécurité du travail au chauffage du sol gelé à la tension jusqu'à 10 kV consiste en exception complète du séjour des gens et des animaux dans la zone des tensions dangereux de pas. Par les mesures multiples on établit les valeurs des tensions de pas sur le sol à la tension de service sur les électrodes 10 kV; la tension de pas 40 V était observée, en général, sur la distance 9–10 m des électrodes participant au chauffage du sol. Les tensions étaient mesurées entre les électrodes verticales de contrôle, situées à une distance de 5–7 m et approfondies dans le sol à 1,5 m.

La barrière de la zone dangereuse du chauffage électrique prévoit la disposition sur la distance 15 m des électrodes extrêmes ouvrières de la barrière multiétagée molle de corde affermie sur les supports d'inventaire en bois. Les fins des cordes tiennent ferme vers les leviers des interrupteurs finaux établis sur les supports. Les fins des cordes sont fixées aux leviers des interrupteurs finaux établis sur les supports. Les interrupteurs finaux fonctionnent à la tension de chacun des barrières horizontales de corde que provoque l'arrêt de la tension amenée à l'installation de chauffage électrique du sol.

### **Conclusions principales**

1. Le chauffage électrique du béton et du sol est une méthode efficace assurant la réduction du temps de la fabrication des produits en béton et les augmentations de leur qualité.
2. Pour chauffage électrique du béton est confortable d'appliquer des transformateurs de soudure.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Par quelles méthodes on réalise le traitement thermique du béton ?
2. Quelles électrodes sont appliquées au chauffage du béton ?
3. Caractérisez la méthode de chauffage par induction du béton ?
4. Quels transformateurs on applique pour chauffage électrique béton ?
5. Comment est réalisé le chauffage du béton par les fourneaux électriques de la résistance ?
6. Quelles sont les particularités de la technologie traitement du béton à vapeur ?
7. Quelles sont les particularités de la technologie traitement du béton par les rayons infrarouges ?
8. Comment est réalisé le chauffage par du sol par les électrodes horizontales ?
9. Comment est réalisé le chauffage par du sol par les électrodes verticales ?
10. Quelles sont les règles principales de sécurité du travail au chauffage électrique ?

## Chapitre 20 : INSTALLATIONS DE L'ÉCLAIRAGE

**Notions clés :** intensité lumineuse,  $f$ ; flux lumineux,  $m$ ; éclairage lumineux,  $m$ ; source de lumière,  $m$ ; lampe de l'incandescence,  $f$ ; tube fluorescent,  $m$ ; lampe à vapeur de mercure,  $f$ ; armature d'éclairage,  $f$ ; luminaire,  $m$ ; méthode de la capacité spécifique,  $f$ .

### 20.1 Informations de base

Une bonne organisation de l'éclairage électrique sur un chantier a la signification essentielle pour le succès de l'exécution des travaux de construction, particulièrement en automne et en hiver à la réduction du temps clair des jours. L'éclairage insuffisant du poste de travail réduit la productivité, dégrade la qualité du travail et, en outre en plusieurs cas, est la raison du traumatisme (accidents).

La suffisance de l'éclairage et sa qualité sont estimée aux paramètres, qui sont définis dans les valeurs lumineuses et les unités de leur mesure. Dans le Système International d'Unités (SI) comme unité de base lumineuse est l'**intensité lumineuse** (son symbole est la lettre latine  $J$ ) et l'unité de sa mesure – une candela (en abrégé - cd). La deuxième pas moins importante valeur lumineuse est le flux lumineux (est désigné par la lettre grecque  $\Phi$ ); l'unité de sa mesure – lumen (en abrégé – lm).

La suffisance de l'éclairage sur n'importe quel plan ou dans n'importe quel point est définie par la valeur de l'**éclairage lumineux** (est désigné par la lettre latine  $E$ ); l'unité de mesure de l'éclairage lumineux – lux (lx).

Pour l'exécution des travaux exacts dans les ateliers mécaniques selon les normes on demande l'éclairage à 100–150 lx, et pour la lecture – de l'ordre de 75 lx.

Les normes et les règles de construction établissent les valeurs minimales de l'éclairage nécessaire pour n'importe quels locaux : industriel, de service et sociaux. À leur base sont élaborés les normes de l'éclairage électrique des travaux de construction et de montage (voire le tableau 20.1).

L'éclairage peut être général, articulé et combiné. De plus l'éclairage total se subdivise sur l'éclairage uniforme et l'éclairage localisé.

À l'éclairage général uniforme est éclairé tout le local ou le terrain extérieur, les luminaires s'établissent régulièrement. À l'éclairage général localisé sur les terrains séparés du local ou sur le territoire extérieur on fait éclairage supplémentaire. Sur tels terrains s'établissent les luminaires supplémentaires ou ils s'installent plus souvent. À l'éclairage articulé on éclaire seulement les surfaces ouvrières. À l'éclairage combiné est appliqué l'éclairage général et l'éclairage local.

Dans les conditions de la construction on applique l'éclairage des lieux de travail comme général (uniforme et localisé) et combiné (dernier dans les usines de réparation, d'ateliers et d'autres locaux semblables).

**Tableau 20.1** –Normes de l'éclairage des travaux de construction et de montage

Nom des terrains du territoire et des opérations ouvrières	Éclairage lumineux $E, lx$	Plan, dont on règle l'éclairage	Remarque
Le territoire du chantier de construction du côté de la production des travaux	2	Horizontale au niveau du sol	L'éclairage doit être multilatéral
Les autoroutes sur le territoire du chantier avec le mouvement	3	La même chose	—
Les voies ferrées sur le territoire de la construction	0,5	—	—
Les travaux de terrassement produits par les mécanismes de	5–10	Horizontale, verticale	—
Le montage des structures de construction	25	Horizontale, verticale	—
Le bétonnage	25	À la surface du béton	—
Les travaux de finition	50	Sur la surface ouvrière	—
Les travaux de grue et de gréement	10	L'horizontale	—
L'assemblage et le montage des mécanismes de construction	50	La même chose	Les moyens supplémentaires portables d'éclairage sont nécessaires
Le montage de l'équipement	50	Sur la surface ouvrière	La même chose

Excepté l'éclairage ouvrier, on installe l'éclairage de remplacement assurant l'éclairage minimal. Pour l'éclairage de remplacement on fait l'alimentation séparée.

## 20.2 Sources de lumière et armature d'éclairage

**20.2.1 Sources de lumière.** À titre des sources de lumière sur la construction et à l'industrie on applique les lampes de l'incandescence et les tubes fluorescents, qui, à son tour, se subdivisent sur les lampes à vapeur de mercure à basse pression - fluorescent et les lampes à vapeur de mercure à haute pression – les lampes ДРЛ.

Dans les *lampes de l'incandescence* l'énergie lumineuse réussit aux frais de la chauffe du fil fin de tungstène par le courant électrique. Le fil est placé au bulbe de verre (ou enveloppe) rempli par le gaz inerte; il y a aussi des structures des lampes de l'incandescence, dont le fil est placé dans le vide – du bulbe on recule l'air. Chauffé (à la température de l'ordre de 3000°C) le fil brille. Le bulbe de la lampe est affermi sur un bouchon métallique avec filetage, à l'aide de qui la

lampe est vissée dans un mandrin servant pour sa connexion aux fils du réseau électrique.

Les lampes de l'incandescence on produit sur les tensions 220, 127, 36 et 12 V. Sur les chantiers, en général, on applique les lampes de 220 V. On les produise à la puissance de 15 à 1500 W. Les lampes de l'incandescence pour les tensions 36 et 12 V sont produit à la puissance de 11 à 100 W.

Lors de la réduction de la tension contre nominal le flux lumineux et le rendement lumineux des lampes de l'incandescence baissent rudement. L'augmentation de la tension au-dessus de 105 % de nominal diminue considérablement la durée de service de la lampe.

Le fonctionnement des **lampes à décharge dans un gaz** est fondée sur la décharge électrique dans le milieu du gaz raréfié. En comparaison avec les lampes de l'incandescence elle se caractérisent par une plus petite consommation de l'énergie électrique.

Le **tube fluorescent** (fig. 20.1,) représente un tube long en verre (de l'ordre de 450–1500 mm) avec deux socles aux fins, rempli par le gaz raréfié – l'argon et une petite quantité de vapeurs du mercure. Sur la surface intérieure du tube est appliquée une couche de la composition spéciale – le luminophore. Aux socles de la lampe on soude les électrodes de tungstène. Lors de la connection de la lampe au réseau électrique entre ses électrodes dans les vapeurs du mercure dans le tube apparaît un décharge de gaz et l'irradiation invisible ultraviolette, sous l'influence de qui le luminophore commence à briller – donne la lumière vive visible. Les tubes fluorescents font partie du réseau à l'aide de l'appareillage spécial de démarrage et de régulation.

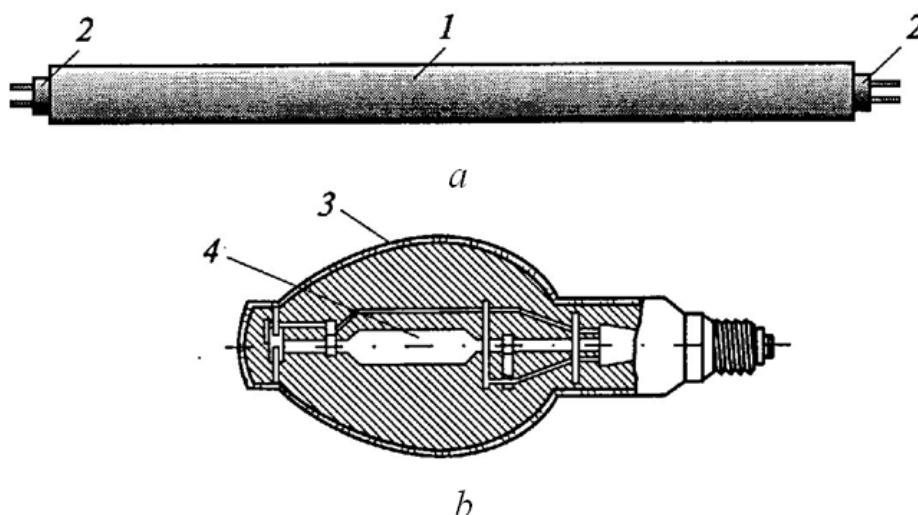
On produise les tubes fluorescents de puissance à 15, 20, 30, 40 et 80 W, de cinq types selon la chromaticité (coloration) de la lumière émise : ЛДЦ - la lumière du jour, destiné à la bonne reproduction des couleurs ; ЛД - la lumière du jour ; ЛХБ – la lumière froide blanche ; ЛТБ – la lumière chaude blanche et ЛБ – la lumière blanche.

Par l'efficacité lumineuse de 1 W de puissance toutes les tubes fluorescentes considérablement surpassent (à 2,5 de 4 fois) les lampes de l'incandescence. Les lampes de la lumière blanche (ЛБ) possèdent le plus grand l'efficacité lumineuse. Ils sont recommandés pour l'éclairage de tous les locaux industriels, excepté ceux-là où on demande la bonne distinction des nuances colorées.

La **lampe à vapeur de mercure** de la haute pression du type ДРЛ par son apparence est semblable à une grande lampe de l'incandescence. Son installation est montrée sur la figure 20.1, *b*.

À la différence de la lampe fluorescente dans la lampe ДРЛ la décharge électrique dans les vapeurs mercurielles se passe non dans tout le ballon, et dans un petit tube (« brûleur ») du verre de quartz, transparent pour les rayons ultraviolets (fig. 20.1, *b*). Sous l'influence de l'irradiation ultraviolette du brûleur le luminophore spécial, appliqué sur la surface intérieure du ballon, donne la lumière vive, un peu verdâtre (proche vers blanc).

Les lampes ДРЛ ont un bouchon avec filetage et sont vissés aux mêmes cartouches que les lampes de l'incandescence. Cependant ils font partie du réseau de la même façon que les lampes fluorescentes, selon un schéma spécial à l'aide des l'appareillage spécial de démarrage et de régulation, contenant le ballast, le starter, le support, les condensateurs, etc.



**Figure 20.1** – Lampes à décharge dans un gaz :  
*a* – fluorescente ; *b* – à mercure ; 1 – tube ; 2 – socle ;  
 3 – bulbe ; 4 – brûleur du verre de quartz

On fabrique les lampes ДРЛ de puissance 250, 500 750 et 1000 W. Comme les sources lumineuses ces lampes sont très rentables.

**20.2.2 Armature d'éclairage.** L'éclairage correctement organisé, avant tout, doit créer l'éclairage suffisant pour que l'œil de la personne puisse facilement, sans se fatiguer, de distinguer tous les détails nécessaires au travail donné. En outre l'éclairage selon la possibilité doit être uniforme, sans ombres rudes ; la source de lumière ne doit pas être directement visible par l'œil (pour qu'il n'y avait pas action aveuglant).

Pour la création des conditions nécessaires d'éclairage, satisfaisant aux exigences indiquées, sert l'armature d'éclairage.

L'armature d'éclairage avec une lampe, placé en elle, s'appelle le **luminaire**. Les types principaux des luminaires, appliqués dans les conditions de la construction avec les lampes de l'incandescence, fluorescent et ДРЛ, sont présentés sur les figures 20.2 – 20.5.

On utilise les luminaires pour l'éclairage des objets disposés sur d'assez petites distances. À titre des appareils d'éclairage de l'action lointaine on applique les projecteurs de divers types.

Pour l'éclairage des chantiers de construction servent les projecteurs à flots de lumière, travaillant avec les lampes ordinaires de l'incandescence de puissance de 200 à 1000 W (voir la figure 20.5).

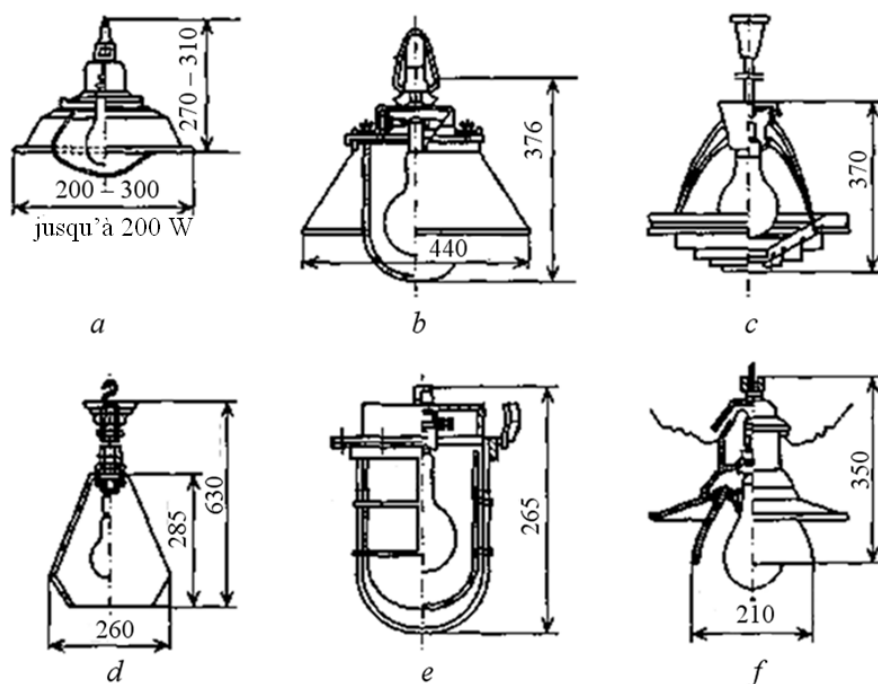


Figure 20.2 – Luminaires avec les lampes à incandescence :  
*a* – de type « Universal » ; *b* – industriel compacté ; *c* – annulaire de type ПМ-1 ;  
*d* – « Lyutsetta » ; *e* – de mine normal (PH-100) ; *f* – d'éclairage extérieur de type ЧПО

### 20.3 Installations d'éclairage

L'éclairage extérieur du territoire des chantiers est réalisé principalement par les projecteurs à flots de lumière. Les projecteurs (particulièrement, de type ПЗС-35) on établis par les groupes de 3–4 et plus sur les mâts, dont la hauteur dépend de l'intensité lumineuse et la puissance des projecteurs : plus l'intensité lumineuse du projecteur, plus haut il doit être établi.

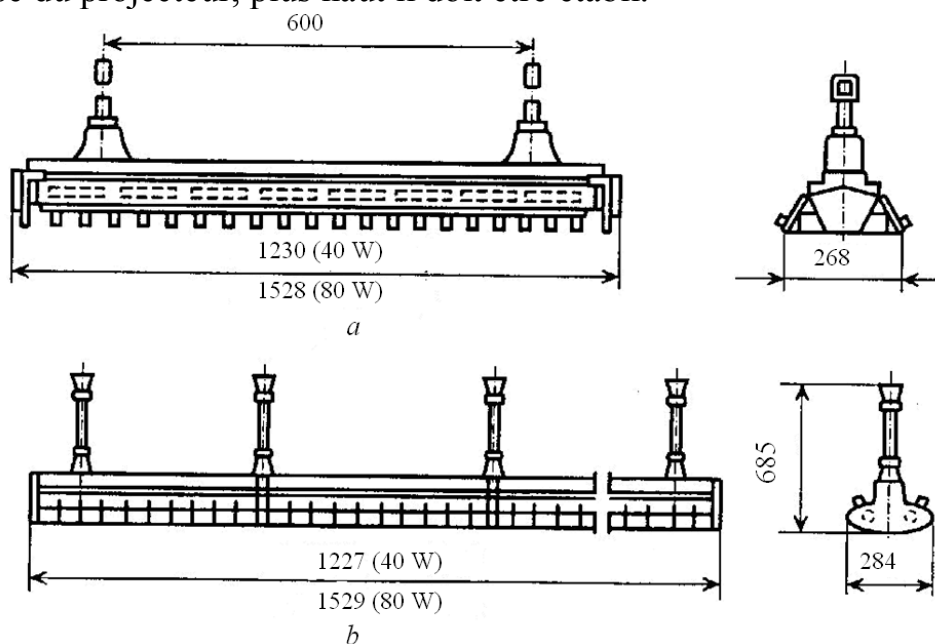
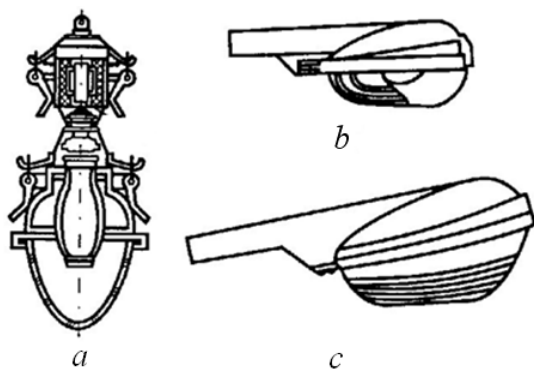
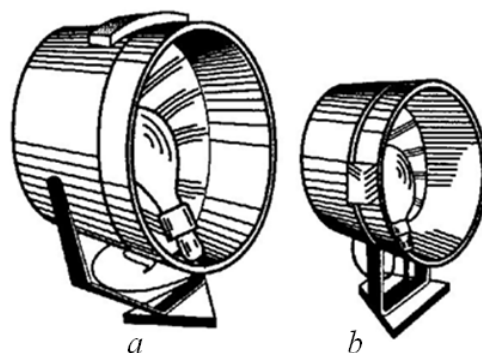


Figure 20.3 – Luminaires avec les lampes lumineuses :  
*a* – de type ОДР и ОДОР avec deux lampes de 40 ou 80 W ;  
*b* – de type ШЛД avec deux lampes de 40 ou 80 W





**Figure 20.4** – Luminaires pour les lampes à mercure de type ДРЛ : *a* – de type suspendu ; *b* et *c* – de type console



**Figure 20.5** – Projecteurs à flots de lumière : *a* – de type ПЗС-45 avec une lampe de 1000 W ; *b* – de type ПЗС-45 avec une lampe de 500 W

Ce faisant l'axe optique du projecteur s'établit presque horizontalement – sous l'angle  $8-15^\circ$  en bas à l'horizontale. Pratiquement on prend la hauteur suivante minimale de l'installation des projecteurs sur le niveau de la terre : ПЗС-45 avec la lampe de 1000 W – 21 m, ПЗС-35 avec la lampe de 500 W – 13 m.

Il est rationnel d'appliquer les mâts d'inventaire portables de projecteurs. Une des structures de tels mâts est présenté sur la figure 20.6.

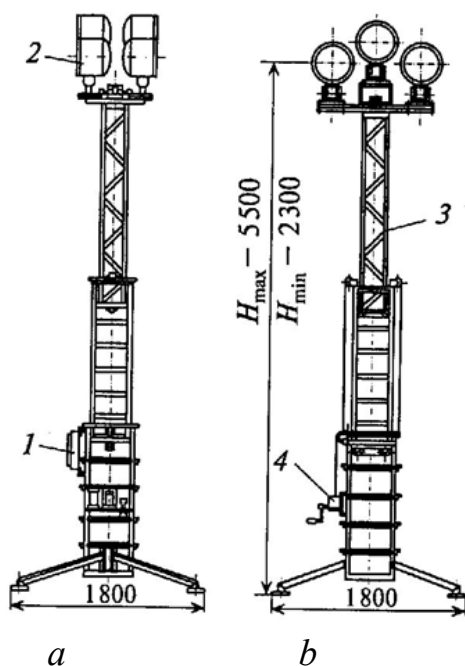
La distance entre les mâts de projecteurs est généralement de 80–100 à 200–250 m (de plus petits chiffres se rapportent aux projecteurs de la plus petite puissance).

Pour l'éclairage supplémentaire des zones ouvrières on applique les mâts d'inventaire portables avec les projecteurs de faible puissance (avec les lampes de 200 W) ou avec les luminaires.

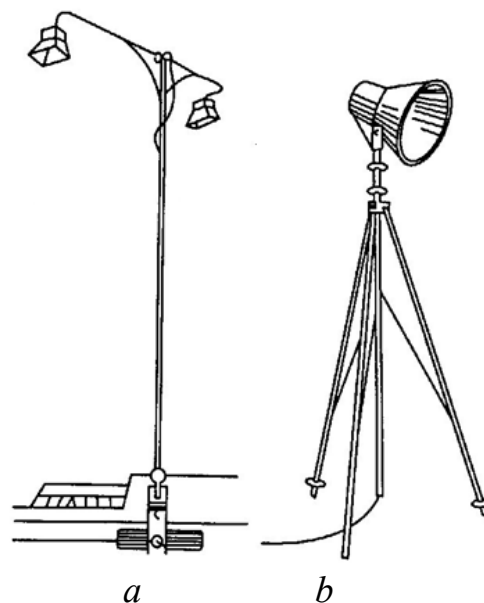
La figure 20.7 présente tels mâts d'inventaire. En outre sur les excavateurs et d'autres grandes voitures de construction on établit aussi les projecteurs de faible puissance pour éclairage supplémentaire de la zone des travaux.

L'éclairage des chemins, qui ne se trouvent pas dans la zone éclairée par les projecteurs, on réalise par les luminaires avec l'armature de l'éclairage extérieur ЧИО ou « Ouniversal » avec les lampes de puissance 200–300 W. On suspende les luminaires sur les supports vers les poteaux de la ligne aérienne à la hauteur près de 6 m de la terre et sur une distance 25–35 m un de l'autre. Pour le même but, et aussi pour l'éclairage des terrains séparés du territoire de la construction avec le succès on peut appliquer les luminaires avec les plus économes lampes à vapeur de mercure de type ДРЛ.

L'éclairage général des entreprises industrielles de la construction on réalise ou par les lampes de l'incandescence, ou les tubes fluorescents à l'aide des luminaires à tubes (voir les figures 20.2 et 20.3). Pour les locaux industriels secs on applique les luminaires « Ouniversal », circulaire ПМ-1 avec les lampes de l'incandescence ou les luminaires des types de ОД et de ОДР avec les tubes fluorescents. On éclaire les locaux humides et poussiéreux par les luminaires à tubes condensés comme ПУ ou PH avec les lampes de l'incandescence, on peut appliquer aussi les luminaires « Ouniversal ». On suspende les luminaires à la hauteur de 2,5–3,5 m au-dessus des surfaces ouvrières, la distance entre eux on accepte égal environ à double de la hauteur de la suspension des luminaires.



**Figure 20.6** – Mât d'inventaire télescopique de projecteurs de type ТИМ-6 : *a* – vue de côté ; *b* – vue de face ; 1 – tablier distributif ; 2 – projecteurs ; 3 – construction métallique ; 4 – treuil à main



**Figure 20.7** – Mât d'inventaire avec les luminaires : *a* – mât télescopique de type ИПСК-2 avec deux luminaires pour l'éclairage des travaux du briquetage ; *b* – mât de type ПТС-2 avec un luminaire pour l'éclairage local des zones ouvrières

L'éclairage local des aires de travail dans les ateliers est accompli à l'aide des luminaires АМО-60 produits pour ces buts et des autres avec les lampes de l'incandescence. Pour l'éclairage temporaire des bâtiments en voie de construction on utilise les mêmes luminaires énumérés ci-dessus avec les lampes de l'incandescence. En complément de l'éclairage général on applique principalement l'éclairage local des zones ouvrières, pour quoi on utilise les mâts d'inventaire portables et les installations suspendues avec les luminaires.

Selon les exigences de la sécurité du travail l'éclairage temporaire des bâtiments est recommandé d'arranger sur la tension baissée (36 V), reçu des transformateurs abaisseurs de tension. Si l'éclairage temporaire a la tension de 220 et 127 V, les luminaires, selon les règles, doivent être suspendus à la hauteur de pas moins 2,5 m du plancher et on doit faire de plus l'attention spéciale à l'état de l'isolation des fils de la pose temporaire, l'intégrité de l'enveloppe isolant des cartouches, etc.

## 20.4 Calcule simplifié des installations d'éclairage

Dans les conditions de la construction dans de nombreux cas (en l'absence du projet de l'éclairage électrique) il peut être nécessaire de la définition de la quantité et la capacité des appareils d'éclairage, les projecteurs ou les luminaires, pour l'installation de l'éclairage demandé par les normes sur n'importe quel terrain du territoire de la construction ou dans quelque local. Pour ces buts est commode la *méthode de la puissance spécifique*.

Nous examinerons les modalités de calcul par cette méthode. Les données selon les normes de l'éclairage, dont il faut se guider au calcul, sont amenées dans le tableau 20.1.

**Eclairage extérieur par projecteurs.** Le nombre des projecteurs nécessaires à l'éclairage de la place donnée, selon la méthode de la puissance spécifique est défini par la formule :

$$N = \omega \cdot E \cdot S / P_L \quad (20.1)$$

où :

$\omega$  – puissance spécifique des lampes des projecteurs par 1 m<sup>2</sup> de la surface éclairée et 1 lx de l'éclairage (de celle-ci on accepte : pour les projecteurs ПЗС-35 égal à 0,25–0,4 W/m<sup>2</sup>·lx, et pour les projecteurs ПЗС-45 égal à 0,2–0,3 W/m<sup>2</sup>·lx) ;

$E$  – éclairement lumineux, lx (voir le tableau 20.1) ;

$S$  – surface pour l'éclairage, m<sup>2</sup> ;

$P_L$  – puissance de la lampe du projecteur, W.

**Exemple 1.** Il faut d'éclairer par les projecteurs un chantier dont les dimensions sont 205 x 100 m.

**Résolution.** D'après les données du tableau 20.1 il faut accepter l'éclairage ( $E$ ) du terrain au niveau de la terre égale à 2 lx.

Le type des projecteurs nous accepterons ПЗС-35 avec une lampe de 500 W.

Trouvons la surface éclairée :  $S = 205 \times 100 = 20500 \text{ m}^2$ .

La puissance spécifique des projecteurs ( $\omega$ ) nous accepterons 0,30 W/m<sup>2</sup>·lx.

Définissons le nombre des projecteurs par la formule (20.1) :

$$N = 0,3 \cdot 2 \cdot 20500 / 500 = 24,6.$$

Il faut établir 24 projecteurs sur six mâts de la hauteur de l'ordre de 13 m, ayant installé les mâts selon le contour du terrain.

**Eclairage intérieur.** Le calcul de l'éclairage général à l'intérieur des bâtiments industriels, administratifs et aussi et d'autres locaux des bâtiments on accomplit par la méthode analogue de la puissance spécifique.

Les données nécessaires les calculs simplifiés sont amenées dans le tableau 20.2.

**Tableau 20.2** – Puissance spécifique de l'éclairage uniforme générale par le luminaire « Ouniversal » avec des lampes de l'incandescence

Hauteur de calcul, m	Surface de la salle, m <sup>2</sup>	Puissance spécifique ( $\omega'$ , W/m <sup>2</sup> ) à l'éclairage minimal (lx), égal à					
		20	30	50	75	100	150
2-3	25-50	6,4	8,6	13,8	19,5	24,5	35
	50-150	5,3	7,2	11,4	16,3	21	29
	150-300	4,7	6,4	10,2	14,3	18,5	26
3-4	30-50	6,4	8,9	14,5	20,5	25	35
	50-120	5,5	7,6	12	17	21,5	29,5
	120-300	4,7	6,6	10,2	14	18	25

La séquence de calcul est suivante. D'après les données du tableau 20.1 on définit la valeur de l'éclairage correspondant aux conditions données. On choisit pour le local donné le type du luminaire, indiquent (conformément aux montants du local) la hauteur de calcul de la suspension des luminaires. Puis selon le tableau 20.2 on trouve pour le type donné du luminaire, la hauteur de calcul de la suspension des luminaires, les surfaces des locaux et l'éclairage demandé la valeur de la puissance spécifique dans  $W/m^2$ . La hauteur de calcul de la suspension (est désigné  $h_c$ ) s'appelle la hauteur de la suspension du luminaire au-dessus de la surface éclairée ouvrière (la machine-outil, l'établi, la table).

En multipliant la signification trouvée de la puissance spécifique sur la surface du local, on calcule la puissance totale des lampes des luminaires, nécessaire au local donné :

$$P_{\text{tot}} = \omega' \cdot S, \quad (20.2)$$

où :

$\omega'$  – puissance spécifique des lampes des luminaires,  $W/m^2$  ;

$S$  – surface du local,  $m^2$  .

Après cela, en connaissant les puissances standard des lampes pour le luminaire donné, on choisit le nombre de luminaires et la puissance des lampes.

**Exemple 2.** Il faut d'éclairer le chantier un atelier de montage dont la surface est  $190 m^2$ . La hauteur de la suspension des luminaires au-dessus du plancher ne doit être plus bas de  $3,5 m$ .

**Résolution.**

Pour l'éclairage de l'atelier nous choisirons les lampes de l'incandescence, les luminaires « Ouniversal », la hauteur de la suspension –  $3,5 m$ .

En acceptant la hauteur des surfaces des établis éclairées sur le plancher à  $0,8 m$ , nous trouvons la hauteur de calcul de la suspension des luminaires égal à

$$h_{\text{calc}} = 3,5 - 0,8 = 2,7 m.$$

Du tableau 20.1 nous trouvons pour l'atelier l'éclairage minimal –  $50 lx$  (le groupe « montage de l'équipement »).

Du tableau 20.2 pour les conditions données nous choisissons la valeur de la puissance spécifique –  $10,2 W/m^2$ . La puissance totale des lampes pour l'éclairage de l'atelier est définie par la formule (20.2) :

$$P_{\text{tot}} = 10,2 \cdot 190 = 1938 \approx 2000 W.$$

Il faut installer 10 luminaires avec les lampes de  $200 W$  (2 séries par 5 luminaires).

## Conclusions principales

1. Les installations d' éclairage électrique sont un élément important de l'équipement des chantiers et des entreprises de l'industrie de construction. Elles assurent les normes nécessaires de l'éclairage des postes de travail.

2. En pratiquement on applique l'éclairage générale, local et combiné des postes de travail.

3. A l'exception de l'éclairage ouvrier conventionnel on installe l'éclairage d'avarie, qui assure l'éclairage minimal dans les locaux. Pour l'éclairage d'avarie on utilise l'alimentation séparée.

4. À titre des sources de lumière on applique les lampes de l'incandescence et les lampes à décharge dans un gaz.

5. Les lampes à décharge par rapport aux lampes à incandescence se distinguent par une plus petite consommation de l'énergie électrique.

### **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Dans quelles unités on mesure l'intensité lumineuse, le flux lumineux et l'éclairement lumineux ?

2. Quels types de l'éclairage des postes de travail on applique dans les conditions de la construction ?

3. Quelles sources de lumière on applique sur les chantiers et les entreprises de l'industrie de construction ?

4. En quoi consistent les particularités des lampes fluorescentes ?

5. Expliquez que représente l'armature d'éclairage ? À quoi elle est destinée ?

6. Quels types des luminaires on applique en pratique ?

7. Dans quels cas pour l'éclairage on applique les projecteurs ?

8. Expliquez, comment on éclaire les chemins, qui ne se trouvent pas dans la zone éclairée par projecteurs ?

9. Expliquez, comment on arrange l'éclairage articulé des zones ouvrières ?

10. Caractérisez les exigences de la sécurité du travail à l'éclairage temporaire des bâtiments.

11. En quoi consiste et dans quels cas est utilisés la méthode de calcul de l'éclairage qui s'appelle la méthode de la puissance spécifique ?

## **Chapitre 21 : INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DES BÂTIMENTS**

**Notions clés :** système, *m* (de ventilation, d'air conditionné, de climatisation, d'approvisionnement en eau, de chauffage) ; ascenseur, *m* ; escaliers mécaniques, *m* ; conditionneur, *m* ; convecteur électrique, *m*.

### **21.1 Informations générales**

Les bâtiments modernes (d'habitation, publics et industriels) se caractérisent par des systèmes techniques intégrés, assurant la gestion effective de l'exploitation des bâtiments. Le rôle considérable dans ces systèmes est accompli par de diverses installations électriques : de conditionnement et de ventilation de l'air, de chauffage des bâtiments, les humecteurs et les purificateurs de l'air, les ascenseurs et les installations élévatrices, etc.

De plus en plus fréquent des immeubles de grande hauteur et les centres commerciaux, qui représentent un système complexe constructif avec un grand nombre des communications de génie, avec le placement sur un objet de différents systèmes d'ingénierie du support de la vie de la complexité augmentée. De nombreux bâtiments sont multifonctionnels. Ils contiennent ou un élément principal fonctionnel (résidentiel, administratif, de bureau, d'hôtelier), ou deux éléments principaux fonctionnels (résidentiel et de bureau, de bureau et d'hôtelier, résidentiel et d'hôtelier). En outre dans les immeubles il y a des éléments auxiliaires fonctionnels destinés au service des gens, tels que : parkings, locaux techniques, piscines, salles de musculation, salles pour le jeu du bowling, bains-sauna ; cabinets ambulatoires et médicaux, etc. Aussi dans les immeubles peuvent être les objets de la destination de toute la ville : magasins, restaurants, café, buffets, institutions financières et bancaires, divers bureaux, etc.

Les composants principaux des systèmes de génie des bâtiments sont : alimentation électrique, approvisionnement en chaleur et en eau, traitement de l'eau, canalisation, ventilation, équipement climatique, conditionnement, chauffage électrique, systèmes de défense d'incendie, ioniseurs et purificateurs de l'air, éclairage et l'autres.

Un important rôle dans les systèmes de génie des bâtiments est joué par le matériel électrique tels que : électromoteurs et appareillage de démarrage et de commande de l'équipement technologique, sanitaire, contre l'incendie, installations de levage et de transport, mécanismes de nettoyage, ainsi que les récepteur électriques de l'équipement thermique, de laboratoire médical et d'autres appareils analogues et les appareils du réseau électrique avec tout l'ensemble des conducteurs et les appareillages.

Ces dernières années ont montré leurs efficacité les organisations spécialisées, qui effectuent le montage, le service et la réparation des équipements de fabrication des systèmes de génie des bâtiments (installations de la climatisation, ascenseurs, installations contre l'incendie, etc.) ce que souvent est très rationnellement du point de vue des considérations économiques et techniques. En même temps dans les

grands bâtiments publics on organise les services du génie, dont les travailleurs réalisent l'exploitation et le service de ces installations électrotechniques.

Ci-dessous nous examinerons certains groupes du matériel électrique des systèmes de génie des bâtiments.

## 21.2 Systèmes de ventilation et d'air conditionné

La tâche des systèmes du conditionnement et la ventilation de l'air - la création, le réglage et le maintien automatique du microclimat confortable dans les locaux fermés : les températures, l'humidité, la propreté, les vitesses du mouvement de l'air, etc.

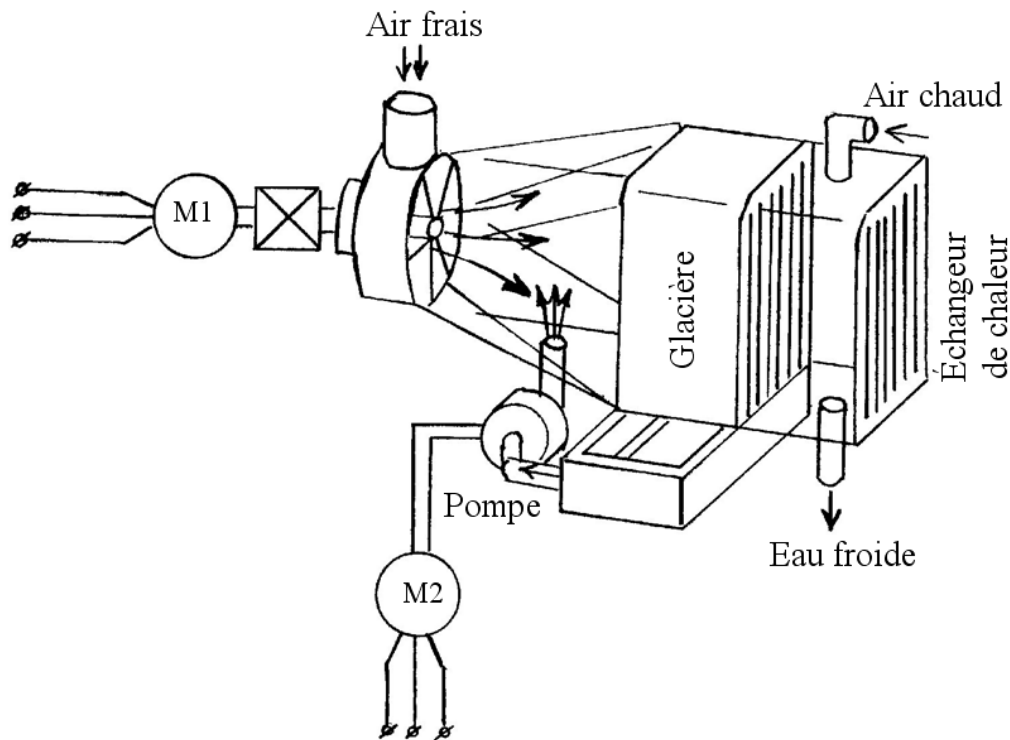
Le conditionnement se réalise par l'ensemble des équipements appelés le **système de climatisation**. Dans la *composition du système de climatisation entrent : les équipements de l'enceinte de l'air, la préparation de ses paramètres (les filtres, les échangeurs, les humecteurs ou les sécheurs), les déplacements (ventilateurs) et ses distributions, ainsi que les moyens de l'automatique, la télécommande et le contrôle*. Les systèmes de la climatisation de grands bâtiments publics, administratifs et industriels sont réalisés, en général, comme les systèmes complexes automatisés de contrôle et de gestion du climat des batiments.

**Système de climatisation centralisées (SCC).** Ces systèmes sont appliqués pour les bâtiments à plusieurs étages fonctionnels, dont les locaux sont unis par les tâches communes : polycliniques, locaux de bureaux, les locaux industriels, les archives, les stocks ect. Tels systèmes sont approvisionnés en chaleur (livré par l'eau chaude, la vapeur ou l'électricité), en froid (livré par l'eau froide ou le fluide frigorigène) ou en électricité pour la garantie du fonctionnement des ventilateurs, des pompes, etc. SCC permettent effectivement de maintenir la température donnée et l'humidité relative de l'air, réduction du bruit et des vibrations ce qui est important dans les locaux avec les exigences augmentées à l'acoustique (radios et téléstudios, studios de l'inscription, etc.).

**Système de climatisation locaux.** Tipiquement ces systèmes sont fondés sur la base des climatiseurs autonomes et pas autonomes, établis directement dans les locaux servis. Parmi les dignités de tels systèmes – la simplicité de d'installation et de montage, la possibilité d'installation dans les locaux déjà construit, dans les pièces séparées des bâtiments dans un état de construction, par exemple, si leur régime de la consommation du froid/chaleur se distingue rudement de la plupart des autres locaux.

Outre l'amélioration des paramètres (recirculation) d'air déjà présent dans le local, il y a aussi des split-systèmes assurant l'admission et l'écoulement de l'air nettoyé du dehors.

Sur la figure 21.1 est montré l'exemple de la constitution d'un conditionneur dans lequel le moteur asynchrone M1 est utilisé pour l'entraînement du ventilateur, qui fournit l'air frais dans la glacière, et le moteur asynchrone M2 – pour l'entraînement de la pompe de circulation du fluide frigorigène.



**Figure 21.1** – Eléments de la constitution d'un conditionneur

### 21.3 Ascenseurs et escaliers mécaniques

*L'ascenseur* représente une machine stationnaire de levage vertical de l'action périodique, destiné pour la montée et la descente des gens, ainsi que les charges. Le transport des gens se réalise par les partis séparés dans une heure fixée, de plus le mouvement alterne avec les arrêts pour l'embarquement et débarquement des gens. L'ascenseur c'est l'élévateur le plus répandu de l'action périodique.

Aux machines passagers de levage et de transport se rapportent aussi les funiculaires. Ces voitures on utilise habituellement sur les montées raides. Ainsi à Yalta le funiculaire est utilisé pour la montée sur la montagne d'Aj-Petri, à Kiev – sur la Colline de Vladimir.

Aux engins de manutention de l'action continue se rapportent les escaliers mécaniques (escaliers roulants). L'embarquement et débarquement des voyageurs de telles voitures se passe sans arrêt les derniers en train du travail. Les escaliers mécaniques sont utilisés dans les zones caractéristiques de la plupart des bâtiments publics où le nombre de passagers est considérable : dans les métropolitains, les ports, les gares et les grands magasins.

D'autre part là, où le nombre de passagers est relativement petit et inconstant (les maisons d'habitation, les locaux), on établis les ascenseurs. Selon destination les ascenseurs sont : ascenseur à personnel, de charge, mixte, d'hôpital et spécial. Selon la vitesse les ascenseurs on les subdivise : à faible vitesse – jusqu'à 1 m/s ; rapide – de 1 m/s jusqu'à 2,5 m/s ; rapide – de 2,5 m/s jusqu'à 9,2 m/s.

Du point de vue simplifiée l'ascenseur à personnel avec l'entraînement électrique représente la cabine suspendue sur les câbles d'acier dans la mine verticale. La grue établie dans le local de machine enroule les câbles au tambour. La cabine se déplace selon les guides affermis aux murs de la mine.



Les ascenseurs modernes ce sont les systèmes assez complexes avec la capacité de charge de 50 kg (100, 150 et 250 kg – de petite charge) jusqu'à 5000 kg. Ils sont équipés des systèmes complexes des installations automatiques prévenant les situations d'accident.

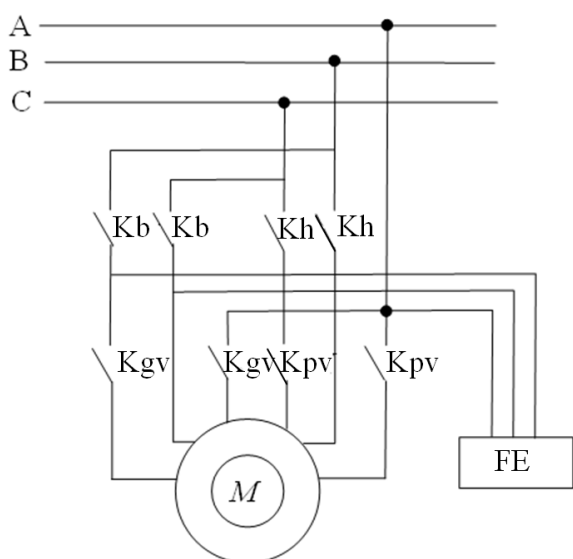
Dans les centres d'affaires, les banques et d'autres bâtiments publics a établi une pratique installer des ascenseurs, permettant de servir de grand flux de passagers aux périodes de l'arrivée et la sortie des collaborateurs. Dans ce cas, pas nécessairement augmenter le nombre d'ascenseurs ou leur charge.

Aujourd'hui les fonctions semblables peuvent être décidées également à l'aide du logiciel spécial, dont sont équipés certains modèles des ascenseurs des producteurs principaux. Ainsi, il y a des programmes spéciaux pour la réduction du temps d'attente de l'arrivée de l'ascenseur.

Les complexes commerciaux et les expocentres assez souvent sont équipés des ascenseurs panoramiques. L'ascenseur panoramique peut avoir une diverse configuration. Il donne la possibilité de vue d'ensemble de 360°. Pour la création de vue panoramique souvent on applique des cabines en verre ou des panneaux en verre du plancher à plafond.

La compétition sur le marché des ascenseurs oblige les entreprises constamment à augmenter la qualité de la production. C'est favorisé la modernisation de la production, l'installation de l'équipement moderne de la technologie avancée, l'élaboration des nouvelles structures des ascenseurs. L'élargissement de la nomenclature des entreprises-fabricants assure aux clients le grand choix de l'équipement. Ainsi, à côté des projets standard et en série les usines fabriquent les ascenseurs sur les projets individuels.

**21.3.1 Matériel électrique des ascenseurs** selon la composition et la destination est analogue au matériel électrique des voitures de levage et de transport (voir le chapitre 17.3). La tension de la source d'alimentation est donné au local de machine de l'ascenseur dans l'installation d'introduction, qui doit déconnecter l'alimentation de l'électromoteur d'entraînement, les circuits de commande, le système d'alarme et l'éclairage de la cabine de l'ascenseur.



**Figure 21.2** – Circuits de force de l'ascenseur de charge

Pour l'alimentation des chaînes du système d'alarme et l'éclairage de réparation on utilise les transformateurs abaisseurs de tension avec les tensions nominales des bobinages primaires 220 et 380 V, les bobinages secondaires – 24 et 36 V. Les puissances des transformateurs abaisseurs de 250 à 1500 VA.

Sur la figure 21.2 est montré à titre d'exemple le fragment du schéma des circuits de force de l'ascenseur de charge. Sur le schéma sont montrés : M – le moteur asynchrone à deux vitesses, FE – le frein électromagnétique, Kb – les contacts

de force du conjoncteur « en bas »,  $K_h$  – les contacts de force du conjoncteur « en haut »,  $K_{gv}$  – les contacts de force du conjoncteur « grande vitesse »,  $K_{pv}$  – les contacts de force du conjoncteur « petite vitesse ».

Pour la protection des électromoteurs contre les surcharges et les courts-circuits on utilise les conjoncteurs-disjoncteurs avec des déclencheurs thermiques et électromagnétiques.

Pour mettre sous tension des chaînes de force des électromoteurs et des électro-aimants de frein on applique les conjoncteurs du courant continu et alternatif.

## 21.4 Eléments des systèmes de l'approvisionnement en eau

Au matériel électrique des systèmes de l'approvisionnement en eau se rapportent les électromoteurs des pompes des systèmes de l'approvisionnement en eau chaude et eau froide et des réseaux de la conduite d'eau contre l'incendie.

Dans la plupart des cas dans les réseaux de l'approvisionnement en eau s'établit deux pompes (parfois trois ou quatre) avec les électromoteurs asynchrones : un ouvrier, deuxième – de réserve. Le mode de l'électromoteur est défini par la destination des pompes. Ainsi dans les systèmes de l'approvisionnement en eau chaude la température et la pression de l'eau sont soutenue automatiquement à l'aide de divers détecteurs assurant l'insertion automatique des pompes. Et, en fonction des conditions de l'environnement, le mode des électromoteurs peut être de longue durée ou cadencé. Les électromoteurs des systèmes contre l'incendie sont incluses en cas d'incendie et fonctionnent jusqu'à son étouffement (le régime de longue durée).

Sur la figure 21.3 on amène à titre d'exemple le schéma de commande de deux pompes de l'approvisionnement en eau froide, qui s'établissent dans les points centraux thermiques et servent le groupe des maisons d'habitation et d'autres bâtiments du quartier. Les pompes font partie alternativement, grâce à quoi on assure l'usure égale des deux groupes de machines. Le schéma fonctionne comme il suit.

Lors de la fermeture du contact de la pression minimale  $SP1$  fonctionne le relais  $IK$ , qui ferme ses contacts  $1K6$  et donne la tension sur la bobine du démarreur  $IKM$ . Le dernier insère dans le travail la pompe. Simultanément le relais  $IK$  par le contact  $IK3$  donne la tension sur la bobine du relais  $3K$ , qui blocs eux-mêmes et prépare la chaîne du relais  $2K$ . Lors de la fermeture réitérée du contact  $SP1$  fonctionne le relais  $2K$ , qui insère maintenant dans le travail la deuxième pompe et désactive le relais  $3K$ . Ainsi, à chaque fermeture du contact  $SP1$  fonctionnent alternativement les relais  $K1$  et  $K2$ , et, par voie de conséquence, font partie alternativement l'électromoteur de la première pompe  $M1$  et la deuxième pompe  $M2$ . L'arrêt de la pompe travaillant se réalise à l'aide de relais  $4K$ , qui fonctionne au court-circuit du contact de la pression maxima  $SP2$ .

Si la pompe travaillant n'augmente pas la pression au réseau, le contact  $SP1$  ne s'ouvre pas, et alors avec un petit extrait du temps assuré par le relais  $IKT$ , fonctionne ou le relais  $IKV$  ou les relais  $2KV$ , qui déconnecte la pompe défectueuse et insère la pompe de réserve.

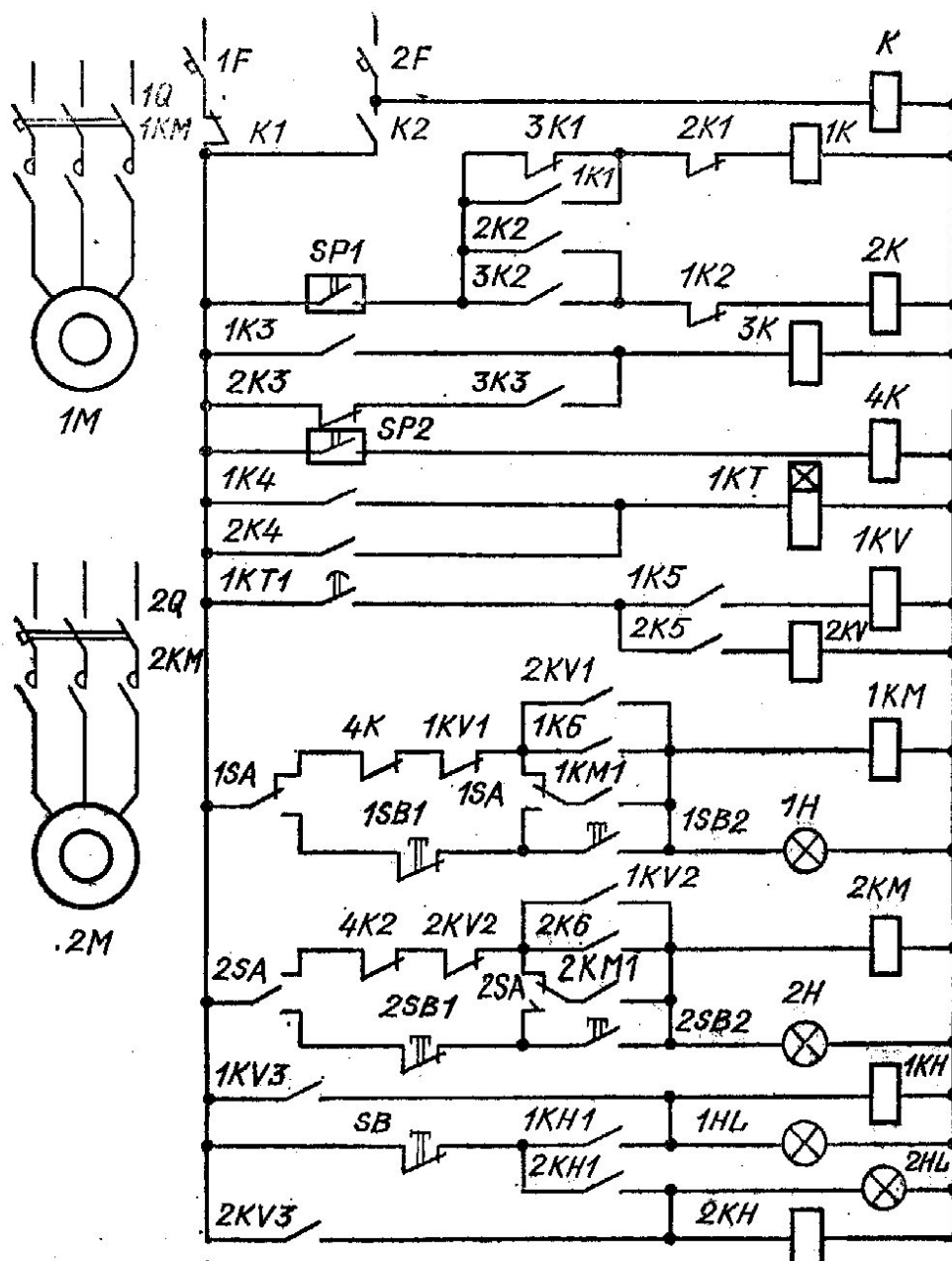


Figure 21.3 – Schéma de commande des pompes d'augmentation de la tension

Le fonctionnement des pompes est signalé par les lampes vertes *1H* et *2H*, et l'avarie des pompes – par les lampes rouges *1HL* et *2HL*.

Le relais *K* sert pour la commutation automatique de l'alimentation des circuits de commande en cas de la disparition de la tension dans les chaînes de force d'un des électromoteurs.

Pour l'exécution des travaux de réparation et de réglage on prévoit la commande des pompes par les boutons locaux *1SB1*, *2SB2*. La commutation sur la commande locale se réalise à l'aide des commutateurs *1SA* et *2SA*.

## 21.5 Chauffage électrique

Assez longtemps on pensait que le chauffage électrique est cher, fait risque d'incendie et est écologiquement nuisible. Le progrès dans le domaine de la production des convecteurs et les thermostats, l'apparition des nouveaux types des appareils de chauffage électrique, à savoir l'échauffement de câble des planchers et des appareils de chauffage infrarouge, de manière significative a changé des caractéristiques d'exploitation des dispositifs modernes. L'équipement destiné aux surfaces habitables, est écologiquement propre (la température des éléments chauffants est insignifiante eux ne changent pas l'humidité), avec sécurité incendie, a la classe correspondante de la protection contre la défaite par le courant électrique, travaille silencieusement et ne met pas en relief aucunes substances nuisibles. Le champ électromagnétique de ces appareils se trouve au niveau de fond. En tout, les systèmes modernes de chauffage électrique des bâtiments répondent aux exigences les plus rigides selon l'écologie et la sécurité.

Les plus larges possibilités sont apparues au chauffage électrique pour l'utilisation économe et rationnelle de l'énergie électrique.

Dans chaque local chauffé s'établit le thermostat, permettant de régler la température dans une large gamme (5–30°C). Il faut remarquer que la réduction de la température sur 1°C diminue les dépenses de l'énergie électrique à 4–5 %. Au remplacement souple des régimes de température dans chaque local séparé l'économie peut atteindre 30–50 %. L'économie particulièrement essentielle (jusqu'à 80 %) est atteinte pour haut (plus haut 4,5 m) les objets à l'utilisation des appareils de chauffage infrarouges ou « le plancher chaud ». Il y a une possibilité de programmer n'importe quel graphique du changement des températures, on peut déconnecter n'importe quelle pièce, le groupe des pièces ou l'étage entier. Après l'arrêt temporaire de l'alimentation électrique le chauffage commence à travailler sans l'intervention de la personne.

Dans les maisons d'habitation le chauffage électrique est très confortable comme le complément du déjà existant système de chauffage central. C'est essentiel au refroidissement à la période d'automne et de printemps, quand le chauffage central est déconnecté. Aux périodes critiques en hiver au refroidissement considérable, quand le système central n'assure pas le niveau demandé du confort, le chauffage direct stationnaire électrique assure automatiquement le régime demandé de température, de plus les dépenses d'exploitation sont insignifiants. Il est difficile d'estimer la signification de chauffage électrique supplémentaire de réserve aux avaries et d'autres situations anormales.

Les problèmes spéciaux avec le chauffage électrique apparaissent dans les locaux avec de hauts plafonds (5–10 m) et pauvre d'isolation thermique. C'est les corps d'usine, les stocks, les dépôts, couvert sportif et les salles de concerts, les pavillons d'exposition et commerciaux, etc. Les appareils de chauffage infrarouges sont considérés pour telles constructions comme les appareils les plus effectifs de chauffage, l'économie de l'énergie électrique peut atteindre ici de 80 %.

Les systèmes modernes de chauffage sont projetés et sont montés avec l'utilisation des **électroconvecteurs**. Le nom « convecteur » reflète le principe de la distribution de l'air chaud dans le local – la convection naturelle. Le chauffage de l'air se passe à son passage dans l'élément chauffant. L'air froid passe dans l'élément chauffant, se chauffe et sort dans les persiennes, à sa place occupe l'air du local. Ainsi, l'air chaud circule dans le local, en assurant la chaleur rapide et confortable.

Le convecteur chauffe les locaux sans utiliser les installations pour la circulation forcée de l'air que fait lui comme l'appareil plus sûr et économe par comparaison avec les appareils de chauffage avec le ventilateur inséré. De plus, à la différence des ventilateurs chauffant, les convecteurs, en créant le mouvement effectif de l'air chaud, ne créent pas du tout le bruit au travail.

La température de l'air dans le local est contrôlée par un thermostat inséré avec un capteur. L'utilisateur expose la température nécessaire sur le thermostat, et le capteur de l'air prend la température de l'air entrant et à l'acquisition des paramètres donnés coupe le chauffage. À la réduction de la température dans le local le chauffage de nouveau fait partie. Ainsi, le convecteur soutient la température constante donnée. L'exactitude de l'emprunt de la température dans le local pour certains modèles des convecteurs atteint 0,1 degrés.

Le thermostat des radiateurs d'huile contrôle non pas la température de l'air, et la température de l'huile. C'est pourquoi l'exactitude du maintien de la température chez eux fait beaucoup moins environ de 3–5°C.

Les convecteurs modernes (APPLIMO, SOLO, EURO PLUS, etc.), grâce à l'application des technologies plus récentes et uniques, ont les avantages suivants en comparaison des appareils de chauffage traditionnels (radiateurs d'huile, ventilateurs de chaleur) et d'autres convecteurs.

Le rendement des éléments chauffants atteint 95–99 %.

L'absence complète du bruit au chauffage et au refroidissement de l'élément chauffant. Le radiateur d'huile au travail fait les clics (« glouglou ») caractéristiques, qui se passent au chauffage et au refroidissement de l'huile à l'intérieur de l'appareil.

Le chauffage effectif de l'air ne violant pas son humidité naturelle et ne brûlant pas l'oxygène.

Une grande ressource du travail continu (certains modèles jusqu'à 25 ans).

La grande vitesse de la sortie sur la température ouvrière (1–1,5 minutes). Pour les radiateurs d'huile – jusqu'à 15 minutes.

La dépense de l'énergie électrique dépend des pertes de la chaleur du local chauffé. Selon les données statistiques à la température extérieure -20 °C et la température dans le local de +18 °C pour le chauffage 1 m<sup>3</sup> les locaux il faut 40-45 W de l'énergie électrique que fait 120 W de la puissance établie sur 1 m<sup>2</sup> à la hauteur des plafonds 250–270 centimètres.

## **Conclusions principales**

1. Les composants principaux des systèmes modernes de génie des bâtiments sont : approvisionnement en électricité, en eau, et en chaleur ; traitement de l'eau, canalisation, ventilation, équipement climatique (conditionnement, ventilation, ioniseurs, purificateurs de l'air) ; chauffage électrique, éclairage, systèmes de défense d'incendie, purification des eaux usées et les autres.

2. Les éléments de base des systèmes de support de la vie des immeubles modernes et des centres de commerce et de divertissement sont le matériel électrique de la diverse destination.

3. Dans l'entraînement des systèmes de ventilation, de conditionnement, dans les ascenseurs et les élévateurs, les systèmes de l'approvisionnement en eau et en chaleur on applique les électromoteurs.

## **Questions pour la maîtrise de soi**

1. Quels sont les composants principaux des systèmes de génie des bâtiments ?

2. Quels éléments forment le matériel électrique de force des systèmes de génie des bâtiments ?

3. Quels éléments font partie du système de conditionnement d'air des bâtiments ?

4. Expliquez les fonctions des éléments principaux du matériel électrique des ascenseurs ?

5. Comment on accomplit l'alimentation des chaînes du système d'alarme de l'éclairage de réparation des ascenseurs ?

6. Expliquez le fonctionnement du schéma de la commande des pompes d'augmentation de la tension.

7. Quels sont les avantages des systèmes modernes de chauffage électrique des bâtiments ?

8. Caractérisez les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'énergie électrique pour le chauffage des bâtiments.

## **Chapitre 22 : SÉCURITÉ ÉLECTRIQUE EN GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**Notions clés :** sécurité électriques, *f* ; choc électrique, *m* ; brûlure électrique, *f* ; métallisation de la peau, *f* ; ordre, *m* ; disposition, *f* ; moyens de protection, *m pl* ; mise à la terre, *f* ; mise au neutre, *m* ;

### **22.1 Informations générales**

Dans le cas général la *sécurité électrique* est considérée comme un *système des actions d'organisation et techniques et les moyens, dirigés à la défense des gens de l'influence dangereuse du courant électrique, l'arc électrique, le champ électromagnétique et l'électricité statique*.

Dans le cadre du manuel donné il s'agit de la protection du personnel travaillant avec des outils électriques, sur les installations électrotechnologiques et l'équipement des entreprises de l'industrie de construction et sur les chantiers. La nécessité de la solution de ce problème s'explique par le fait qu'en cas d'accident sur une installation électrique à travers le corps de la personne peut passer le courant électrique, dont la valeur dépend le degré de la défaite.

L'importance de cette question est conditionnée du fait que dans les conditions modernes la productivité dans la construction, comme dans d'autres domaines de l'activité humaine, est définie à un fort degré par l'intensité d'utilisation des outils électriques. À sa croissance constante de plus en plus de l'attention il faut donner aux questions de la sécurité électrique.

Pour la décision de cette tâche on organise les événements d'organisation et on applique séparément ou dans la combinaison l'un avec l'autre de divers procédés techniques et les moyens (mise à la terre protectrice, mise au neutre, l'alignement des potentiels, l'isolation des conducteurs de courant, le système d'alarme prévenant, les blocages, les signes de la sécurité; les moyens de la protection, etc.).

Le système des exigences et des règles de la sécurité électriques en génie de la construction sont exposés à [54, 53].

### **22.2 Action du courant électrique sur l'organisme humain**

Le courant électrique agissant sur l'organisme humain, peut amener aux effets suivants : au choc électrique, brûlure, métallisations de la peau, signe électrique, endommagement mécanique, électroophtalmie. Au passage du courant électrique dans l'organisme humain en premier lieu affecte le système nerveux central, à la suite de quoi on viole le travail du myocarde et les organismes de la respiration.

Le degré de la défaite dépend de l'intensité et de la fréquences du courant, ainsi que de la voie du passage du courant dans l'organisme de la personne (voir le tableau 22.1). Les règles de sécurité technique pour absolument dangereux acceptent l'intensité du courant 50 mA.

**Tableau 22.1** – Degré de l'influence du courant électrique sur l'organisme

Intensité du courant, mA	Courant alternatif de 50-60 Hz	Courant continu
0,6–1,5	Le début de la sensation – une faible démangeaison, picotements de la peau.	Ne se fait pas sentir.
2–3	La sensation du courant se répand au poignet de la main, réduit un peu la main.	Ne se fait pas sentir.
5–7	Les sensations douloureuses, la crampe dans les mains.	La démangeaison. La sensation de la chaleur.
8–10	Les mains s'arrachent avec peine aux électrodes. De fortes douleurs dans les mains et la crampe.	Le renforcement du chauffage.
20–25	Les mains seront paralysées instantanément, les arracher des électrodes il est impossible. De très fortes douleurs dans les mains et la poitrine. Embarrasse la respiration.	Encore plus du chauffage, la réduction insignifiante des muscles des mains.
50–80	La respiration sera paralysée. Le début de la palpitation des ventricules du coeur.	Une forte sensation du chauffage. La réduction des muscles des mains. Les crampes. La difficulté de la respiration.
90–100	La paralysie respiratoire et fibrillation cardiaque par 1–3 s.	La paralysie respiratoire.

Le **choc électrique** amène à l'excitation des tissus vivants. On distingue quelques degrés du poids des électrocutions :

- électrocution du 1er degré – la réduction convulsive des muscles sans perte de connaissance ;
- électrocution du 2ème degré – la réduction convulsive des muscles avec perte de connaissance ;
- électrocution du 3ème degré – perte de connaissance et la violation des fonctions de l'activité cardiaque ou la respiration (n'est pas exclu l'un et l'autre) ;
- électrocution du 4ème degré – la mort clinique.

Le degré de gravité de la défaite électrique dépend de plusieurs facteurs : la résistance de l'organisme ; la valeur, la durée de l'action, le type et la fréquence du courant, sa voie dans l'organisme ; les conditions du milieu ambiant.

L'issue de l'influence du courant électrique dépend et de l'état physique de la personne. Si elle est malade, fatiguée ou se trouve dans l'état de l'ivresse, de la dépression mentale, l'action du courant est particulièrement dangereuse. Pas dangereux pour une personne sont considérés les courants alternatifs jusqu'à 10 mA et les courants continus – jusqu'à 50 mA.

La **brûlure électrique** est la conséquence des courts-circuits dans les installations électriques et la présence des parties du corps de la personne (en général, les mains) dans la sphère de l'irradiation lumineuse (ultraviolette) et thermique (infrarouge) de l'arc électrique. Elle amène aux brûlures 3ème et 4ème degré avec l'issue lourde – au contact de la personne (directement ou dans



l'arc électrique) avec les parties des installations électrique sous tension plus de 1000 V.

Le **signe électrique** est une défaite spécifique, provoquée par les influences mécaniques, chimiques ou communes du courant. L'endroit affecté est pratiquement indolore, autour de lui les procès inflammatoires manquent. Avec le temps il durcit, et les tissus superficiels s'atrophient. D'habitude les électrosignes guérissent vite.

La **métallisation de la peau** est une imbibition de la peau par les particules les plus petites à l'état de vapeur ou fondues du métal sous l'influence de l'action mécanique ou chimique du courant. L'endroit affecté acquiert la surface rigide et la coloration originale. Dans la plupart des cas la métallisation guérit, sans laisser sur la peau des traces.

La défaut de l'oeil par les rayons ultraviolets, dont la source est l'arc électrique, s'appelle l'**électroophtalmie**. À la suite de l'électroophtalmie dans quelques heures arrive le procès inflammatoire.

Conformément à la loi d'Ohm la valeur du courant est définie par la tension et la résistance de la chaîne. Seulement la couche superficielle de la peau possède la résistance considérable électrique. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs (l'humidité de la peau, le degré de l'élargissement des capillaires cutanés etc.) et varie dans de larges limites – de 800 à 100000 Ohm. La résistance baisse rudement, par exemple, à l'utilisation de l'alcool.

Si accepter la résistance du corps d'une personne égal à 1000 Ohm, alors il y aura un courant dangereux à la tension  $U = I \cdot R_{\text{personne}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ V}$ , de plus la source doit rendre la puissance  $P = U \cdot I = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ W}$ .

Si la puissance de la source est considérablement moins de la valeur indiquée, alors les hautes tensions n'amènent pas à la défaite totale de l'organisme de la personne, mais provoquent les sensations désagréables.

En cas d'un défaut d'isolement des installations électrotechniques les composants métalliques non isolées peuvent se trouver sous tension. Si une personne touche une telle pièce métallique, elle sera sous tension, qui s'appelle la **tension de contact**  $U_{\text{cont}}$ .

Conformément aux [40, 41], dangereux pour une personne sont considérées les suivantes tensions de contact : dans le local sec  $U_{\text{cont}} = 65 \text{ V}$  ; dans les locaux crus avec l'humidité relative 75 % et avec les planchers conductifs  $U_{\text{cont}} = 36 \text{ V}$  ; dans les locaux particulièrement dangereux (les cabines métalliques, les chaudières, les locaux avec l'humidité relative 100 %)  $U_{\text{cont}} = 12 \text{ V}$ .

### **22.3 Classification des conditions des travaux par degré de sécurité électrique**

Les travaux produits dans les installations électriques fonctionnant, en ce qui concerne les mesures de sécurité se subdivisent sur les catégories : à la désactivation complète de la tention ; à la désactivation partielle de la tention ; sans la désactivation dans les périphéries et sur les parties conductrices ; sans la désactivation de la tention loin des parties conductrices se trouvant sous tension.

Selon le degré de sécurité électrique on distingue les conditions suivantes du travail.

Les **conditions particulièrement dangereuses** de la défaite des gens par le courant électrique :

- la présence de l'humidité (la pluie, la neige, l'aspersion fréquente et la couverture par l'humidité du plafond, des murs, des objets se trouvant à l'intérieur des locaux) ;
- la présence du milieu chimiquement actif ;
- la présence simultanément deux ou plus conditions du danger augmenté.

Les **conditions à risque élevé** de la défaite des gens par le courant électrique :

- la présence de l'humidité (les vapeurs ou l'humidité condensée, se détachant en forme des gouttes menues, et l'humidité relative plus de 75 %) ;
- la présence de la poussière conductrice (une poussière technologique ou l'autre qui s'est affaissée sur les fils en pénétrant à l'intérieur des machines et des appareils, aggrave les conditions du refroidissement de l'isolation, mais ne provoque pas le danger de l'incendie ou l'explosion) ;
- la présence des bases conductrices (métallique, de terre, en béton armé, en brique) ;
- la présence de la température élevée indépendamment de la saison et de diverses émissions calorifiques (la température excède 35 °C, de courte durée – 40 °C) ;
- la présence des possibilités de contact simultané de la personne avec les constructions métalliques des bâtiments ayant la liaison avec la terre, les appareils technologiques d'une part et avec les corps métalliques du matériel électrique d'autre part.

Les **conditions sans risque élevé** de la défaite des gens par le courant électrique : l'absence des conditions créant le risque élevé ou le danger particulier.

## 22.4 Sécurité des travaux sur les installations électriques

**22.4.1 Actions d'organisation.** Le travail dans les installations électriques est produit selon un ordre de travaux, une disposition, dans l'ordre de l'exploitation en cours.

L'**ordre** – une ordonnance écrite, exposés sur le formulaire de la forme établie, qui définit la place, le temps du début et de la fin des travaux, les conditions de sécurité des travaux, le personnel de l'équipe et les personnes responsables de la sécurité des travaux. Selon l'ordre on doit accomplir les travaux avec la désactivation complète de la tention, avec la désactivation partielle de la tention, sans la désactivation dans les périphéries et sur les parties conductrices se trouvant sous tension.

La **disposition** – un devoir pour le travail dans les installations électriques, enregistré dans le journal opérationnel. La disposition est faite une seule fois, agit sur un travail, sur un poste de travail ou pendant une heure en fonction de la nature du travail. Selon une disposition peuvent s'exécuter des travaux : sans désactivation de la tention loin des parties conductrices se trouvant sous

tension, par la durée pas plus d'un poste, des travaux hors du plan de courte durée et de petits volume (la durée jusqu'à 1 heure), provoqué par les besoins de l'entreprise, avec désactivation complet ou partiel de la tension, ou bien sans désactivation de la tension dans les périphéries et sur les parties conductrices se trouvant sous tension, certains types des travaux avec désactivation complet ou partiel de la tension dans les installations électriques de la tension jusqu'à 1000 V et la durée pas plus d'un post de travail.

Vers les travaux effectués sur la disposition, sans désactivation de la tension loin des parties conductrices, se rapportent : le nettoyage des couloirs et les bureaux des postes de distribution ouverts et fermés ; la réparation de l'équipement d'éclairage, le remplacement des lampes (en dehors des chambres et des cellules, avec désactivation de la tension du terrain du réseau d'éclairage, où on produit les travaux) ; la surveillance des bales, des anneaux et des collecteurs des machines électriques ; le renouvellement des inscriptions sur les capots, etc.

Vers les travaux effectués sur la disposition en cas des besoins de l'entreprise, sans désactivation de la tension dans les périphéries et sur les parties conductrices se trouvant sous tension, se rapportent : les travaux sur les capots du matériel électrique ; les mesures par les pinces de mesure ; le remplacement des fusibles de tension jusqu'à 1000 V ; le contrôle de la chauffe des contacts par une barre ; la définition de la vibration du jeu de barre par une tige ; le contrôle de la séquence des phases, le contrôle de l'isolation par une barre. Ces travaux sont accomplis de courte durée (jusqu'à 1 heure) et pas moins que deux travailleurs.

Vers les travaux dans les installations électriques jusqu'à 1000 V avec désactivation complète ou partiel de la tension, effectués sur la disposition, se rapportent : la réparation des démarreurs magnétiques, les boutons de déclenchement, les joncteurs-disjoncteurs, les interrupteurs, les rhéostats, les joncteurs et l'équipement analogue établi en dehors des bouclier et les assemblages ; la réparation des récepteur électriques séparés (les électromoteurs, les électrocalorifères) ; la réparation des stations magnétiques, disposées séparément et des blocs de commande ; le remplacement des fusibles ; la réparation de la poste d'éclairage. Les travaux doivent être accomplis par deux ouvriers.

Dans l'ordre de fonctionnement actuel de l'équipement le personnel d'exploitation ou le personnel d'exploitation et d'entretien produit les travaux sur le terrain fixé pendant un poste de travail selon la liste spéciale avec l'inscription ultérieure dans le journal opérationnel.

**22.4.2 Actions techniques.** *La conduite des travaux avec désactivation complet ou partiel de la tension dans les installations jusqu'à 1000 V.* On déconnecte tous transformateurs de puissance du côté haute et du côté basse tension. L'arrêt peut être produit : par l'appareil de commutation avec la commande à main, dont les contacts sont visibles du recto (si de plus les contacts ne sont pas visibles, il est nécessaire d'ouvrir les écrans, les portières des capots ou retirer les capots eux-mêmes) ; par les joncteurs avec l'entraînement automatique et la télécommande au retrait des fusibles du courant

de commande par le détachement des fins de la bobine insérant. En l'absence de la mise à la terre portable on prend les mesures supplémentaires : retirent les fusibles, appliquent les appliques isolées dans les interrupteurs et les automates, déconnectent les fins des lignes nourrissant, etc.

Le contrôle de l'absence de la tension doit être produit par un détecteur de tension. L'absence de la tension doit être contrôlée sur toutes les phases. Le contrôle est produit dans les gants diélectriques. Le contrôle de l'absence de la tension dans les réseaux jusqu'à 1000 V est produit par un détecteur de tension ou par un voltmètre portable. L'application des lampes-témoins est admise en cas de la tension composée jusqu'à 220 V.

*Les mesures assurant la sécurité des travaux sans la désactivation complète de la tension.* Le poste de travail de l'électricien doit s'installer de manière que les parties conductrices se trouvant sous tension, se trouvaient devant lui ou d'un côté. Il est nécessaire de se servir des moyens protecteurs. Le vêtement de travail des ouvriers doit être le sourd et avoir les manches baissées et fermées, il est obligatoire de mettre le couvre-chef.

**22.4.3 Moyens de protection** s'appellent les appareils, les dispositifs, les installations portables, qui servent pour la protection du personnel de la défaite du courant électrique. Les normes minimales des assortiments des moyens de protection dans les installations électriques des tensions jusqu'à 1000 V à leur introduction à l'exploitation les suivants : détecteur de tension – un ; pince isolante – une ; gants diélectriques, caoutchoucs – selon deux paires ; outil de montage avec les stylos isolant – pas moins deux assortiments ; mises à la terre portables – pas moins deux ; affiches d'avertissement – pas moins deux assortiments ; tapis diélectriques – deux ; barrières temporaires – pas moins deux assortiments ; lunettes de protection – une vapeur ; masque à gaz – un.

## **22.5 Mise à la terre et mise au neutre**

Une des plus importantes actions, qui considérablement augmentet la sécurité électrique des gens travaillant sur les chantiers, est l'installation de la mise à la terre.

La ***mise à la terre*** représente une liaison des pièces métalliques d'équipement et d'installations électriques à l'aide du conducteur de mise à la terre avec une prise de terre, qui possède une petite résistance de la liaison avec la terre. Elle assure la tension d'attouchement pas dangereuse. La prise de terre et les conducteurs de protection portent le nom de ***l'installation de mise à la terre de protection***.

On utilise la mise à la terre en cas d'un neutre n'est pas relié à la terre.

La ***mise au neutre*** représente la liaison des pièces métalliques d'équipement, normal ne trouvant pas sous tension, avec un conducteur du neutre, qui est plusieurs fois mis à la terre. La mise au neutre est accompli dans les systèmes avec un neutre relié à la terre et assure l'arrêt sûr de l'installation au court-circuit sur le corps.

Les conditions de fonctionnement des installations électriques sur les chantiers à la belle étoile – les humidités, les précipitations atmosphériques, les mécanismes ambulants avec l'entraînements électrique, les réseaux électriques temporaires – créent le danger augmenté de la défaite des gens par le courant électrique.

La raison de la défaite des gens par le courant électrique peut être non seulement l'attouchement aux parties conductrices. À l'endommagement de l'isolation des bâtis d'électromoteurs ou l'équipement de mise en marche et, surtout, connexes pièces métalliques des voitures et des mécanismes de construction se trouvent sous tension. En cas de contact avec ces pièces une personne, en l'absence des mesures protectrices, s'étonne par le courant électrique. Tels cas sont particulièrement dangereux par ce que les ouvriers servant les voitures, sans attendre le danger, touchent constamment ses ferrures. La mise à la terre protectrice sert de la protection contre la défaite par le courant au passage de la tension aux ferrures constructives.

Il faut mettre à la terre les ferrures des voitures de construction et des mécanismes avec l'entraînement électrique, les corps des outils électrique, les corps du matériel électrique et des appareils de démarrage et de régulation, les carcasses et les capots des installations électrotechniques et d'autres ferrures, qui peuvent se trouver sous tension à la suite de l'endommagement de l'isolation.

La conception des composés protecteurs dépend de la tension et du schéma du système d'alimentation.

Les réseaux de tension jusqu'à 1000 V (les réseaux 380/220 V) sur les chantiers sont construits au système à quatre fils : « l'étoile » avec le neutre. Dans tels réseaux, selon les normes, en ordre obligatoire le neutre (le point nul) des transformateurs de puissance est mis à la terre (le système dont le neutre directement relié à la terre).

Pour cela près de chaque poste de transformation (PT) cela arrange le contour de mise à la terre, auquel est connecté la broche du point nul du transformateur, et par conséquent, et le fil nul du réseau. La résistance de l'installation de mise à la terre du PT, selon les règles, doit être pas plus de 4 Ohm (pour les transformateurs par la puissance jusqu'à 100 kVA cette norme augmente jusqu'à 10 Ohm).

Le fil nul des lignes aériennes on mit à la terre de nouveau par chacun 250 m, ainsi qu'aux fins des lignes et les branches, y compris il est obligatoire dans la zone du fonctionnement des mécanismes de construction – des grues à tour, des excavateurs, etc.

Dans les réseaux de neutre directement relié à la terre, on accomplit la mise à la terre protectrice par l'adjonction des parties mises à la terre de l'installation au fil nul du réseau électrique, qui est mis à la terre (fig. 22.1). L'action d'une telle protection (elle s'appelle encore la mise au neutre) consiste en ce qu'en cas de l'endommagement de l'isolation et l'apparition de la tension sur le corps de l'équipement il y a un court-circuit dans une des phases du transformateur dans le fil nul, à la suite de quoi la partie endommagée de l'installation est déconnectée automatiquement, puisque sous l'effet du courant de court-circuit le fusible brûle immédiatement ou l'automate de protection déconnecte le réseau.

La mise à la terre des corps des machines électrique de construction se réalise à l'aide du câble d'alimentation, dont une âme est connecté ou neutre. Une borne de l'âme mettant à la terre est joint au boulon de terre sur le corps (ou les constructions métalliques) des voitures, à l'autre – vers le boulon de terre sur le corps de la boîte de mise en marche ou de la boîte de connexion d'où on alimente la machine. Le corps de la boîte de mise en marche se joint au fil nul du réseau.

La mise à la terre des grues à tour a certaines particularités. En dehors de la mise à la terre de la charpente métallique et les corps du matériel électrique de la grue, qui est fait au moyen de la quatrième l'âme du câble, nécessairement on met à la terre les voies ferrées des grues. De plus les linteaux entre tous les joints des rails, ainsi qu'entre deux fils des rails sont accomplis par la soudure. Les rails se joignent par les conducteurs séparés à la mise à la terre réitérée du fil nul et vers le boulon de mise à la terre de la boîte d'introduction de la grue.

Dans les cas particuliers dans les installations électriques des organisations de construction il y avoir être des réseaux du courant triphasé de tension jusqu'à 1000 V (à trois fils ), travaillant avec le point neutre des transformateurs de puissance. isolé (n'est pas mise à la terre). Les réseaux de telle sorte construisent parfois sur les exploitations de tourbe et dans les productions souterraines.

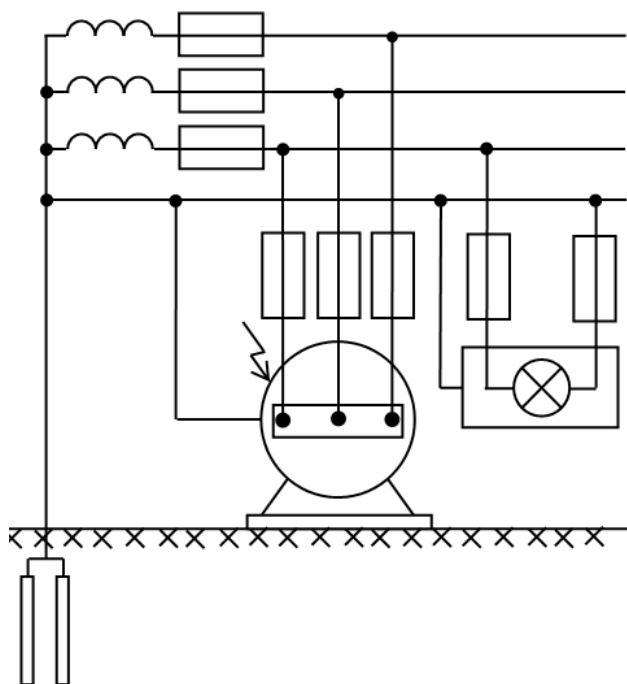
Dans tels réseaux, ainsi que dans toutes les installations électriques de tension plus haut 1000 V (par exemple, dans machines de construction avec entraînements électriques de haute tension) la mise à la terre protectrice est accompli par la construction de l'installation locale de mise à la terre (le contour séparé de mise à la terre) avec l'adjonction à lui des parties mises à la terre de l'équipement (fig. 22.2).

L'installation de mise à la terre locale doit avoir une petite résistance. Selon les normes la résistance d'une telle installation de mise à la terre dans les installations de la tension jusqu'à 1000 V ne doit pas excéder 4 Ohm. Dans les réseaux de la tension 6–10 kV cette signification est définie par le calcul, mais elle ne doit pas excéder 10 Ohm. L'action de la mise à la terre dans ce cas consiste en réduction de la valeur pas dangereux de la tension, qui peut apparaître sur le corps de la voiture ou l'appareil à l'endommagement de l'isolation.

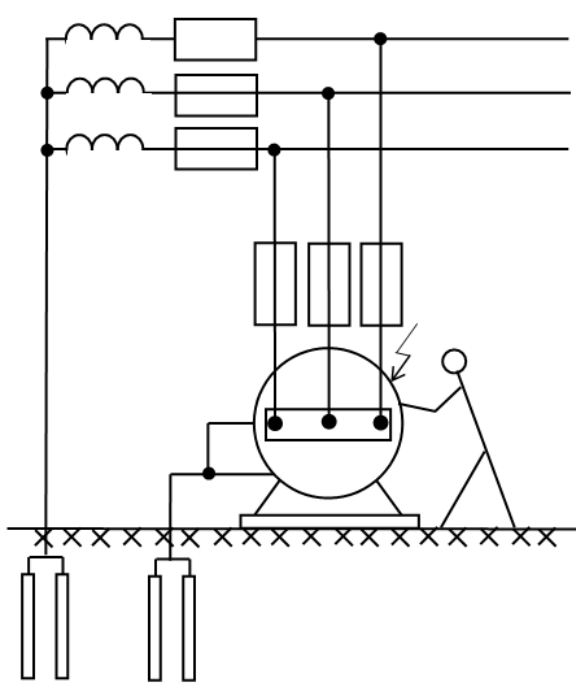
À titre des prises de terre d'artificiel on applique les segments verticalement cloués à la terre du fer d'angle par la section 50 x 50 mm, de la longueur 2–2,5 m ou les pivots en acier de l'acier rond de diamètre 12–14 mm, la longueur jusqu'à 4–5 m (la prise de terre à barreaux).

On lie les prises de terre séparés entre eux-mêmes dans un contour commun de la prise de terre par les lignes en acier de la section 40 x 4 mm. La liaison accomplissent par la soudure. Les conducteurs de prise de terre adjoignent au contour (à la ligne en acier) aussi par la soudure, et vers les corps des appareils et des machines – par des boulons. Le nombre nécessaire des prises de terre dans le contour on détermine par le calcul. Que moins il faut une résistance électrique de l'installation de la prise de terre, plus il faut des prises de terre. De plus, une

grande signification a la nature du terrain, dans laquelle on accomplit la mise à la terre. Plus favorable est le sol argileux, le moins favorable – de sable et rocheux.



**Figure 22.1** – Mise à la terre dans le réseau à quatre fils



**Figure 22.2** – Mise à la terre dans le réseau à trois fils

À l'installation des mises à la terre et pendant l'exploitation du matériel électrique il fait effectuer un certain nombre de mesures – le contrôle de la conformité de l'installation de mise à la terre aux normes. Pour ce but on utilise un appareil spécial : telluromètre – appareil servant à la mesure des résistances de terre.

Telles mesures sont accomplies par les spécialistes-électriciens en conséquence avec des réglementations des normes et des instructions.

### Conclusions principales

1. Le degré de la défaite d'une personne par le courant électrique dépend de la fréquence du courant, de la intensité du courant, de la voie du passage du courant par le corps de la personne, et de l'état physique de l'organisme de la personne.

2. La valeur de la signification admissible de la tension de contact est définie par les degrés de sécurité électriques des conditions du travail de personnel ?

3. Pour la garantie de la sécurité des travaux sur les installations électriques on organise un système des actions organisationnels et techniques et on utilise les moyens de protection.

## Questions pour la maîtrise de soi

1. Quelle intensité du courant est considérée absolument dangereuse pour la vie de la personne ?
2. Que ce qu'on comprenne sous le choc électrique ? Quels sont les degrés de la défaite par le choc électrique ?
3. Que ce qu'on comprenne sous la brûlure électrique ? Quels sont les degrés de la défaite par la brûlure électrique ?
4. Que ce qu'on comprenne sous la métallisation de la peau ? Quels sont les degrés de la défaite par la métallisation de la peau ?
5. Expliquez, qu'est-ce que c'est l'électroophtalmie et quelle est son influence sur personne ?
6. Que ce qu'on comprend sous la tension de contact ? Quelles valeurs de la tension de contact sont considérées dangereuses pour la vie de la personne ?
7. Quelles sont les conditions des travaux par le degré de sécurité électrique ?
8. Caractérisez les actions d'organisation en garantie de sécurité électrique des travaux ?
9. Quelles sont les actions techniques en garantie de sécurité électrique des travaux sur les installations jusqu'à 1000 V ?
10. Quels moyens de protection sont appliqués dans les installations électriques jusqu'à 1000 V ?
11. Que ce qu'on comprend par la mise à la terre protectrice ? Quel-est son principe de l'action ?
12. Que ce qu'on comprend par la mise au neutre protectrice ? Quel-est son principe de l'action ?
13. Quelles sont les raisons principales de la défaite des gens par le courant électrique sur les chantiers ?
14. Comment on accomplit la mise à la terre des corps des machines de construction ?
15. Quelles sont les particularités de la mise à la terre des robinets de construction ?
16. Comment fonctionne la mise à la terre dans les installations électriques avec le neutre isolé ?



## Septième partie : PROBLÈMES ET EXEMPLES DE LEUR SOLUTION

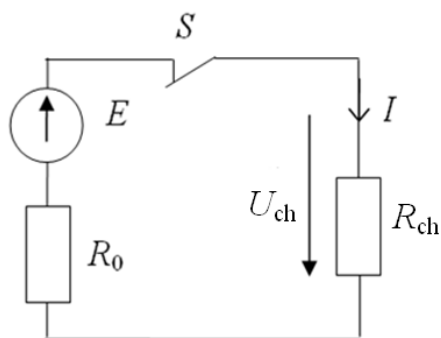
### Chapitre 23 : CIRCUITS ÉLECTRIQUES DE COURANT CONTINU

#### Problème 23.1

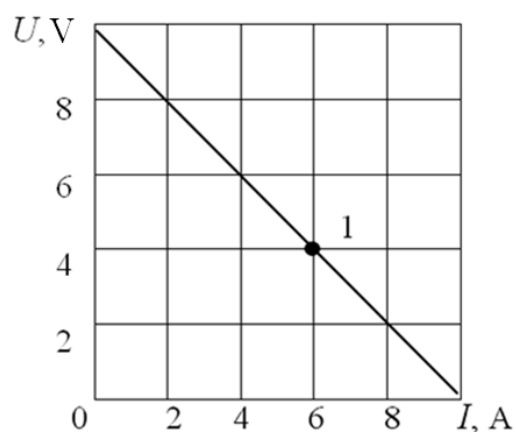
Pour un circuit électrique de la figure 23.1 définir le courant  $I$ , la tension sur les bornes du consommateur  $U_{ch}$ , la puissance de la source d'alimentation  $P_1$  et la puissance  $P_{ch}$  de la chaîne extérieure, le rendement de la source d'alimentation. Construire la caractéristique extérieure  $U(I)$  de la source d'alimentation. Les données initiales pour le calcul : la f.é.m. de la source d'alimentation  $E$ , la résistance intérieure de la source d'alimentation  $R_0$ , la résistance de charge  $R_{ch}$  sont amenées dans le tableau 23.1.

**Tableau 23.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E, V$	10	10	10	10	12	12	12	15	15	15	15
$R_0, \Omega$	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5
$R_{ch}, \Omega$	4	6	3,5	5,5	5	7	7,5	4	5	5,5	6,5



**Figure 23.1** – Schéma du circuit  
au problème 23.1



**Figure 23.2** – Caractéristique extérieure  
de la source d'alimentation

**Résolution de problème** pour la variante K.

D'après la loi de l'Ohm nous définissons la valeur du courant de la charge :

$$I = \frac{E}{R_0 + R_{ch}} = \frac{10}{1 + 4} = 2 \text{ A}.$$

Tension sur les bornes de la source d'alimentation et du consommateur sera

$$U = U_{ch} = R_{ch} \cdot I = 4 \cdot 2 = 8 \text{ V}.$$

Puissance de la source d'alimentation :  $P_1 = E \cdot I = 10 \cdot 2 = 20 \text{ W}$ .

Puissance de la chaîne extérieure (sur la charge) :  $P_{\text{ch}} = U_{\text{ch}} \cdot I = 8 \cdot 2 = 16 \text{ W}$ .

Pertes de la puissance à l'intérieur de la source :  $P_0 = I^2 \cdot R_0 = 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ W}$ .

Rendement :  $\eta = P_{\text{ch}}/P_1 = 16/20 = 0,8$  (ou 80%).

Caractéristique extérieure de la source d'alimentation  $U(I)$  aux significations constantes  $E$  et  $P_{\text{c-c}}$  sera :

à la marche à vide (les contacts de l'interrupteur  $S$  sont ouverts)

$$I = I_{\text{m.à.v.}} = 0 ; U = U_{\text{m.à.v.}} = E = 10 \text{ V} ;$$

au court-circuit (l'interrupteur  $S$  est fermé et  $R_{\text{ch}} = 0$ )

$$I = I_{\text{c-c}} = E/R_0 = 10/1 = 10 \text{ A} ; U_{\text{c-c}} = R_{\text{c-c}} \cdot I_{\text{c-c}} = 0.$$

La dépendance  $U(I)$  est linéaire, c'est pourquoi les données des régimes de la marche à vide et de court-circuit définissent la caractéristique extérieure de la source d'alimentation (fig. 22.2). De cette caractéristique et des significations du courant de la charge  $I$  on peut définir la tension correspondante  $U$  de la source. Par exemple, pour le point 1 à  $I = 6 \text{ A}$ , la tension  $U = 10 - 6 = 4 \text{ V}$ , puisque d'après la deuxième loi de Kirchhoff  $U = E - R_0 \cdot I$ .

L'équation de la balance des puissances (la puissance de la source d'alimentation est égale à la puissance mise en relief en forme de la chaleur dans les résistances  $R_0$  et  $R_{\text{ch}}$ ) :

$$E \cdot I = R_0 \cdot I^2 + R_{\text{ch}} I^2 ; \quad 10 \cdot 2 = 1 \cdot 2^2 + 4 \cdot 2^2 ; \quad 20 \text{ W} = 20 \text{ W}.$$

### Problème 23.2

Pour un circuit électrique (les conditions du problème précédent) définir à quelle résistance de charge  $R_{\text{ch}}$  la source d'alimentation rend la plus grande puissance? Quel est dans ce cas le rendement de l'installation? Construire le graphique du changement de la puissance utile en fonction de la résistance de charge  $P_{\text{ch}}(R_{\text{ch}})$ . Le problème il faut résoudre sous forme générale.

**Résolution de problème** pour la variante K.

Puissance, se détachant dans la résistance de charge

$$P_{\text{ch}} = R_{\text{ch}} \cdot I^2 = \frac{E^2}{(R_0 + R_{\text{ch}})^2} R_{\text{ch}}.$$

Pour la définition de la plus grande puissance, qui rend la source de l'énergie électrique, on prend la première dérivée de la capacité par rapport à la résistance de charge et assimile à zéro :

$$\frac{dP_{\text{ch}}}{dR_{\text{ch}}} = \frac{(R_0 + R_{\text{ch}})^2 - 2 \cdot (R_0 + R_{\text{ch}}) \cdot R_{\text{ch}}}{(R_0 + R_{\text{ch}})^4} \cdot E^2 = 0.$$

Après les transformations nous recevrons  $R_{\text{ch}} = R_0$ , i.e. la source rend la plus grande puissance à l'égalité de la résistance de charge à la résistance intérieure de la source. La puissance maximale rendue par la source de l'énergie électrique à la chaîne extérieure au consommateur à  $R_{\text{ch}} = R_0$ , sera égale

$$P_{\text{ch.max}} = \frac{R_{\text{ch}} \cdot E^2}{(R_0 + R_{\text{ch}})^2} = \frac{E^2}{4 \cdot R_0}, \text{ W.}$$

Le rendement de la source

$$\eta = \frac{P_{\text{ch}}}{P_1} = \frac{R_{\text{ch}} \cdot I^2}{(R_0 + R_{\text{ch}}) \cdot I^2} = \frac{R_{\text{ch}}}{R_0 + R_{\text{ch}}} = \frac{R_0 \cdot I^2}{2 \cdot R_0 \cdot I^2} = 0,5,$$

i.e.  $\eta = 50\%$ . On peut montrer qu'à  $R_{\text{ch}} = 0$  (court-circuit)  $\eta = 0$ ; et à  $R_{\text{ch}} = R_0$  le rendement  $\eta = 0,5$ ; et à  $R_{\text{ch}} = \infty$  le rendement  $\eta = 0$ .

Au changement de la résistance de charge  $R_{\text{ch}}$  la puissance utile change conformément à l'équation

$$P_{\text{ch}} = \frac{R_{\text{ch}} \cdot E^2}{(R_0 + R_{\text{ch}})^2} = \frac{E^2}{R_0} \left[ \frac{a}{(a+1)^2} \right] = \frac{E^2}{R_0} K,$$

où  $K = a/(a+1)^2$ ;  $a = R_0/R_{\text{ch}}$ .

Au cas où  $R_0 = R_{\text{ch}}$ ,  $a = 1$ ,  $P_{\text{ch}} = 0,25 \cdot E^2/R_0$ .

En acceptant  $E$  et  $R_0$  par les constantes et en étant donné de différentes significations de la relation  $R_0/R_{\text{ch}}$ , on peut recevoir le graphique, qui montre dans les unités relatives le changement de la puissance utile  $P_{\text{ch}} = E^2/R_0$  en fonction de la résistance de charge. La dépendance reçue est montrée sur la figure 23.3.

### Problème 23.3

Pour les données de problème 23.1 il faut construire une dépendance de la tension  $U$  sur les bornes de la source d'alimentation, la puissance de la source d'alimentation  $P_1$ , les pertes de la puissance  $P_0$  et le rendement  $\eta$  du courant  $I$  au changement de la résistance de charge dans la limite de  $R_{\text{ch}} = (0, \infty)$ . La F.E.M. de la source d'alimentation considérée comme immuable.

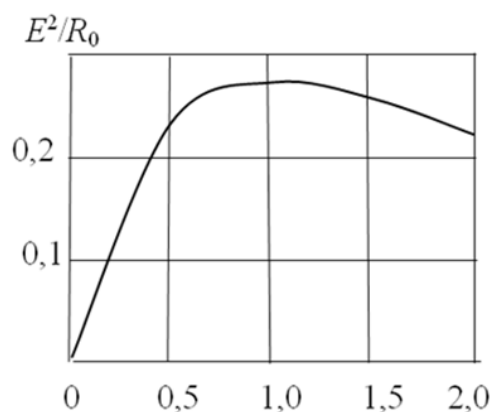
**Résolution de problème** pour la variante K.

L'ordre du calcul pour  $R_{\text{ch}} = 4 \text{ Ohm}$  est amené dans le problème 23.1. Pour d'autres significations de la charge les résultats du calcul sont présentés dans le tableau 23.2.

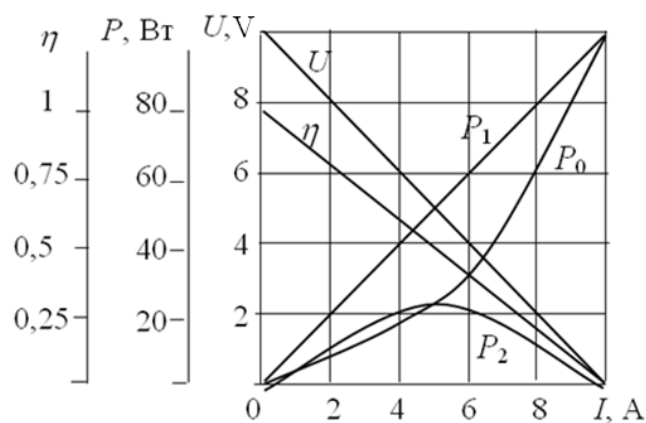
Sur la figure 23.3 on amène les graphiques des valeurs correspondantes en fonction du courant de la charge.

**Tableau 23.2**

$R_{\text{ch}}, \Omega$	0	0,5	1	2	4	6	7	9	$\infty$
$I, \text{ A}$	10	6,7	5	3,3	2	1,4	1,2	1	0
$U, \text{ V}$	0	3,3	5	6,7	8	8,6	8,8	9	10
$P_1, \text{ W}$	100	66,7	50	33,3	20	14,3	12,5	10	0
$P_2, \text{ W}$	0	22,2	25	22,2	16	12,3	10,9	1	0
$P_0, \text{ W}$	100	44,4	25	11,1	4	2,1	1,6	1	0
$\eta$	0	0,3	0,3	0,7	0,8	0,85	0,88	0,9	1



**Figure 23.3** – Dépendance de la capacité utile de la résistance de charge



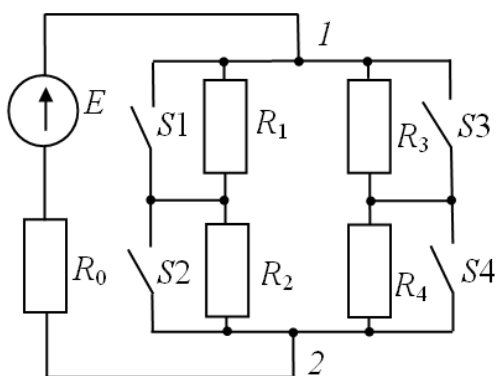
**Figure 23.4** – Dépendances calculées

### Problème 23.4

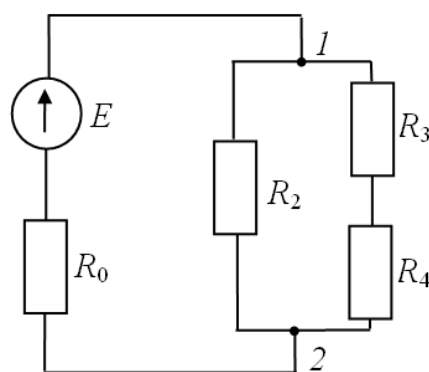
Pour un circuit électrique du courant continu (fig. 23.5) définir la résistance équivalente du consommateur  $R_{12\text{éq}}$ , le courant de la charge, la tension sur les bornes du consommateur  $U_{12}$ , la capacité du consommateur  $P_{12}$  et la puissance de la source d'alimentation  $P_1$ , le rendement de l'installation, faire la balance des puissances. Les données initiales : la position des interrupteurs S1–S4, la f.é.m. de la source  $E$ , la résistance intérieure de la source  $R_0$ , la résistance des résistors  $R_1$ – $R_4$  pour les variantes correspondantes sont amenée dans le tableau 23.3.

**Tableau 23.2**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Interrupteurs fermés	S1	S1	S2	S3	S4		S1	S2	S3	S4	
$E, V$	12	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8
$R_0, \Omega$	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$R_1, \Omega$	6	5	5	5	7	7	6	5	5	5	5
$R_2, \Omega$	6	4	5	5	5	6	5	6	5	6	6
$R_3, \Omega$	5	6	6	5	6	7	5	5	4	4	5
$R_4, \Omega$	5	5	5	5	7	6	5	5	4	5	4



**Figure 23.5** – Schéma au problème 23.4



**Figure 23.6** – Schéma pour la variante K

**Résolution de problème** pour la variante K.

En tenant compte de ce que l'interrupteur *SI* est fermé, nous avons le schéma du circuit pour la variante K qui est monté sur la figure 23.6.

Résistance équivalente du consommateur

$$R_{12\text{éq}} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot (5 + 5)}{6 + 5 + 5} = 3,75 \ \Omega.$$

Courant de la charge

$$I = \frac{E}{R_0 + R_{12\text{éq}}} = \frac{12}{0,5 + 3,75} \approx 2,82 \text{ A}.$$

Tension sur les bornes du consommateur

$$U_{12} = I \cdot R_{12\text{éq}} = 2,82 \cdot 3,75 \approx 10,59 \text{ V}.$$

Puissance du consommateur

$$P_{\text{ch}} = I \cdot U_{12} = 2,82 \cdot 10,59 = 29,9 \text{ W}.$$

Puissance de la source d'alimentation

$$P_{\text{source}} = I \cdot E = 2,82 \cdot 12 = 33,84 \text{ W}.$$

Rendement de l'installation

$$\eta = \frac{P_{\text{ch}}}{P_{\text{source}}} = \frac{29,9}{33,84} \approx 0,88.$$

Balance des puissances :

$$P_{\text{source}} = \Delta P_{\text{source}} + P_{\text{ch}} = R_0 \cdot I^2 + P_{\text{ch}} ;$$

$$33,84 \approx 0,5 \cdot 2,82^2 + 29,9 ;$$

$$33,84 \approx 33,85.$$

Erreur absolue du calcul

$$\Delta = 33,85 - 33,84 = 0,01 \text{ W}.$$

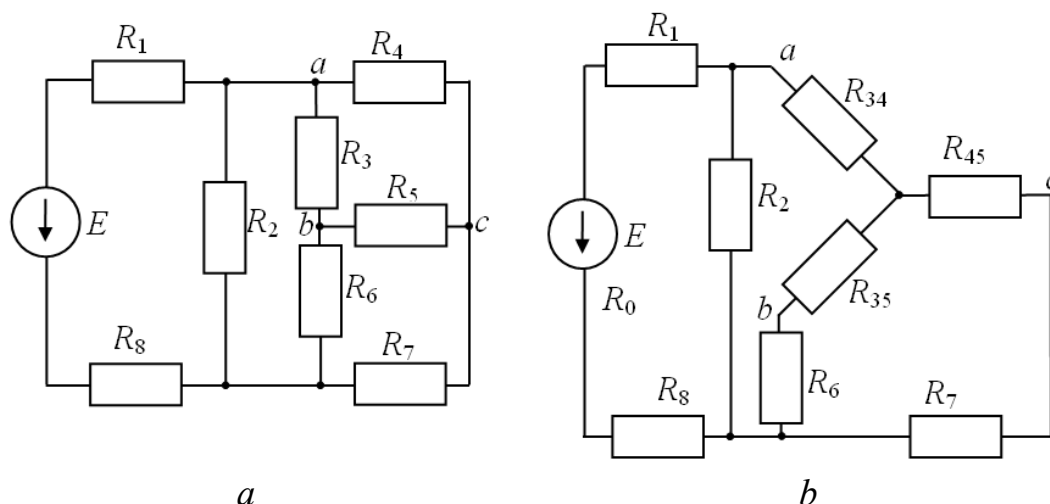
Erreur relative du calcul

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{\text{moy}}} = \frac{0,01}{(33,85 + 33,84)/2} \cdot 100\% = 0,03\%.$$

L'exactitude reçue est acceptable pour les calculs de génie.

### Problème 23.5

Pour un circuit (fig. 23.7) définir la résistance équivalente  $R_{12\text{éq}}$  et le courant total  $I$  du circuit, ainsi que la chute de potentiel sur les résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_8$ . La résistance intérieure de la source négliger. Les données initiales sont amenées dans le tableau 23.4.



**Figure 23.7** – Schéma au problème 23.5 : *a* – initial ; *b* – transformé

**Tableau 23.4**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E, V$	50	40	40	50	50	60	60	60	70	70	70
$R_1, \Omega$	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
$R_2, \Omega$	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6
$R_3, \Omega$	20	20	30	30	30	30	30	25	25	25	25
$R_4, \Omega$	30	30	30	35	35	35	35	35	40	40	40
$R_5, \Omega$	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60
$R_6, \Omega$	100	100	100	90	90	90	90	80	80	80	80
$R_7, \Omega$	5	5	5	5	5	8	8	8	8	8	8
$R_8, \Omega$	1,8	1	1	2	2	3	3	2	2	3	3

**Résolution de problème** pour la variante K.

Ayant transformé « le triangle » des résistances  $R_3, R_4, R_5$  en « étoile » équivalente (fig. 23.7, *b*), nous recevons :

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30 + 50} = 6 \Omega, \quad R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 50}{20 + 30 + 50} = 15 \Omega,$$

$$R_{35} = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 50}{20 + 30 + 50} = 10 \Omega.$$

Résistance l'ensemble (équivalente) des résistances insérées successivement  $R_{45}$  et  $R_7$  :

$$R_{\text{éq1}} = R_{45} + R_7 = 15 + 5 = 20 \Omega.$$

Résistance l'ensemble (équivalente) des résistances insérées successivement  $R_{35}$  et  $R_6$  :

$$R_{\text{éq2}} = R_{35} + R_6 = 10 + 10 = 20 \Omega.$$

Résistance équivalente des branches avec des résistances  $R_{\text{éq1}}, R_{34}$  et  $R_{\text{éq2}}$  :

$$R_{\text{éq3}} = R_{34} + \frac{R_{\text{éq1}} \cdot R_{\text{éq2}}}{R_{\text{éq1}} + R_{\text{éq2}}} = 6 + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 16 \Omega.$$

Résistance l'ensemble du circuit :

$$R_{eq} = R_1 + R_8 + \frac{R_2 \cdot R_{eq3}}{R_2 + R_{eq3}} = 5 + 1,8 + \frac{4 \cdot 16}{4 + 16} = 10 \, \Omega.$$

Courant dans la partie non ramifiée du circuit :

$$I = E/R_{eq} = 50/10 = 5 \, \text{A}.$$

Chute de potentiel sur les résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_8$  :

$$\Delta U_1 = R_1 \cdot I = 5 \cdot 5 = 25 \, \text{V} ;$$

$$\Delta U_8 = R_8 \cdot I = 1,8 \cdot 5 = 9 \, \text{V} ;$$

$$\Delta U_2 = I \frac{R_2 \cdot R_{eq2}}{R_2 + R_{eq2}} = 5 \cdot \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 16 \, \text{V}.$$

**Contrôle.** En vertu de la deuxième loi de Kirchhoff on a :

$$E = U_1 + U_2 + U_3 \text{ ou } 50 \, \text{V} = 25 + 9 + 16 = 50 \, \text{V}.$$

### Problème 23.6

Pour un circuit électrique (fig. 23.8) définir les courants dans les branches, les tensions sur tous les éléments du circuit, la tension  $U_{13}$  entre les noeuds 1-3, la puissance et le mode de la source de la f.é.m.  $E_1$ , la puissance du récepteur dont la résistance  $R_3$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 23.5.

Tableau 23.4

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_1, \text{V}$	12	10	10	12	12	10	12	13	14	15	10
$E_2, \text{V}$	13,5	12	14	14	12	10	10	11	12	10	15
$R_{01}, \Omega$	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
$R_{02}, \Omega$	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
$R_3, \Omega$	3	4	5	4	4	3	4	4	5	6	4
$R_4, \Omega$	4	4	3	5	4	3	5	5	5	4	6
$R_5, \Omega$	4	3	3	5	4	3	5	5	5	4	6

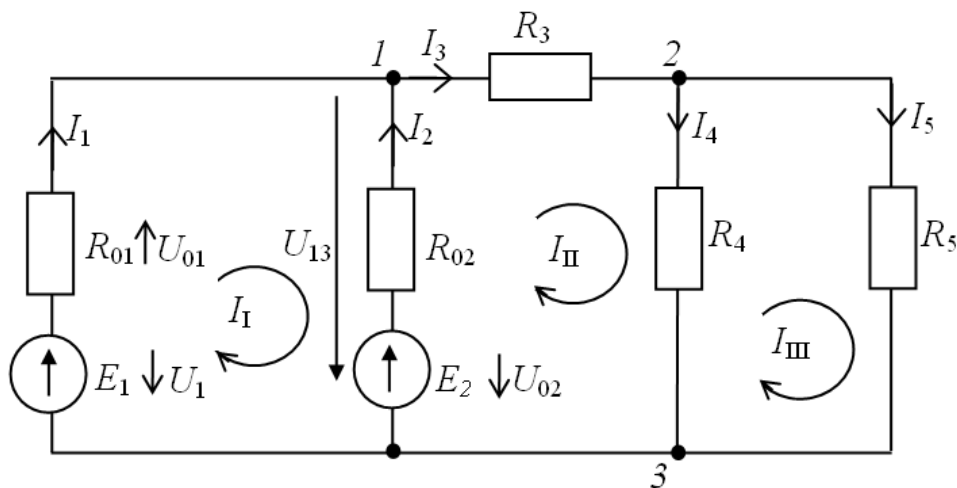


Figure 23.8 – Schéma du circuit au problème 23.6

**Résolution de problème** de la variante K.

Le schéma du circuit a trois noeuds et cinq branches. Pour trouver les courants dans les branches nous avons besoin de faire cinq équations : deux équations d'après 1re loi de Kirchhoff et trois équations d'après 2ème loi de Kirchhoff.

Prenons les sens des courants dans les branches et de parcourir des contours (I, II et III) et appliquons sur le schéma.

Ecrivons l'équation d'après 1re loi de Kirchhoff pour les noeuds 1 et 2 et d'après 2ème loi de Kirchhoff pour les contours choisis. Le système des équations sera :

pour le noeud 1	$I_1 + I_2 - I_3 = 0 ;$
pour le noeud 2	$I_3 - I_4 - I_5 = 0 ;$
pour le contour I	$R_{01} \cdot I_3 + R_{02} \cdot I_2 = E_1 - E_2 ;$
pour le contour II	$R_{02} \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 = E_2 ;$
pour le contour III	$- R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = 0.$

La résolution de système donne la signification des courants dans les branches :

$$I_1 = -7,93 \text{ A} ; I_2 = 11,03 \text{ A} ; I_3 = 3,1 \text{ A} ; I_4 = I_5 = 1,55 \text{ A}.$$

Puisque le courant  $I_1$  a le signe le moins, sa sens valable est opposée accepté sur le schéma (fig. 23.8).

Les tensions sur les résistances définirons d'après la loi de l'Ohm :

$$U_3 = R_3 \cdot I_3 = 2 \cdot 3,1 = 6,2 \text{ V} ; \quad U_4 = R_4 \cdot I_4 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ V} ; \\ U_5 = R_5 \cdot I_5 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ V}.$$

La tension entre les noeuds 1 et 3 trouvons en utilisant la deuxième loi de Kirchhoff :

$$E_2 = U_{02} + U_{13} ; U_{13} = E_2 - U_{02} = E_2 - R_{02} \cdot I_2 = 13,5 - 0,1 \cdot 11 = 12,4 \text{ V}.$$

La puissance de la source de f.é.m.  $E_2$

$$P_2 = E_2 \cdot I_2 = 13,5 \cdot 11 = 148,5 \text{ W}.$$

La puissance du récepteur

$$P_3 = R_3 \cdot I_3^2 = U_3 \cdot I_3 = 6,2 \cdot 3,1 = 19,2 \text{ W}.$$

Dans la source de f.é.m.  $E_1$  le courant et la f.é.m. sont dirigés à la rencontre. Cela signifie que dans les conditions données du problème la source consomme l'énergie électrique.

Puisque la source de f.é.m.  $E_1$  travaille en régime de la consommation de l'énergie électrique, i.e. comme l'électrorécepteur, l'équation de la balance des capacités a l'air

$$E_2 \cdot I_2 = E_1 \cdot I_1 + R_{01} \cdot I_1^2 + R_{02} \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2.$$

Après la substitution des significations reçues nous aurons

$$13,5 \cdot 11 = 12 \cdot 7,9 + 0,05 \cdot 7,9^2 + 0,1 \cdot 11^2 + 2 \cdot 3,1^2 + 4 \cdot 1,55^2. \\ 148,5 \text{ W} = 148,5 \text{ W}.$$

L'égalité reçue confirme que le calcul est correcte.



### Problème 23.7

Pour le schéma du circuit électrique et les données initiales du problème 23.6 définir les courants dans les branches de la chaîne électrique par la méthode des courants des mailles.

**Résolution de problème** de la variante K.

Système des équations des courants des mailles pour le schéma donné (fig. 22.8) a l'air

$$\begin{cases} R_{11}I_I - R_{12}I_{II} - R_{13}I_{III} = E_I \\ R_{21}I_I - R_{22}I_{II} - R_{23}I_{III} = E_{II} \\ R_{31}I_I - R_{32}I_{II} - R_{33}I_{III} = E_{III}, \end{cases}$$

où les résistances et les F.E.M. des mailles ont les significations suivantes :

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_{01} + R_{01} = 0,15 \, \Omega ; & R_{22} &= R_{02} + R_2 + R_4 = 6,1 \, \Omega ; \\ R_{33} &= R_4 + R_5 = 8 \, \Omega ; & R_{12} &= R_{21} = R_{02} = 0,1 \, \Omega ; \\ R_{13} &= R_{31} = 0 \, \Omega ; & R_{23} &= R_{32} = R_4 = 4 \, \Omega ; \\ E_I &= E_1 - E_2 = -1,5 \, \text{V} ; & E_{II} &= E_2 = 13,5 \, \text{V} ; & E_{III} &= 0 \, \text{V}. \end{aligned}$$

La résolution de système reçu des équations des courants des mailles nous donnent leurs significations  $I_I = -7,93 \, \text{A}$ ,  $I_{II} = 3,1 \, \text{A}$ ,  $I_{III} = 1,55 \, \text{A}$ .

Ensuite nous trouvons les courants dans les branches :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I = -7,93 \, \text{A}, & I_2 &= I_{II} - I_I = 11,03 \, \text{A}, & I_3 &= I_{II} = 3,1 \, \text{A}, \\ I_4 &= I_{II} - I_{III} = 1,55 \, \text{A}, & I_5 &= I_{III} = 1,55 \, \text{A}. \end{aligned}$$

Comme est marqué plus tôt, le signe le moins près des courants  $I_I$  et  $I_1$  signifie que leurs sens valables sont opposées aux sens accepté sur le schéma du remplacement.

### Problème 23.8

Pour le schéma du circuit électrique et les données initiales du problème 23.6 définir les courants dans les branches par la méthode nodale.

**Résolution de problème** de la variante K.

Nous définissons la signification des coefficients de la matrice conductibilité de système des potentiels des noeuds (3.8) :

$$\begin{aligned} G_{11} &= \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{2} = 30,5 \, \text{S (siemens)}, \\ G_{22} &= \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 1 \, \text{S}, & G_{12} &= G_{21} = -\frac{1}{R_3} = -\frac{1}{2} = -0,5 \, \text{S}. \end{aligned}$$

Les significations des courants des noeuds

$$I_{\text{noeud1}} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \, \text{A}, \quad I_{\text{noeud2}} = 0.$$

Le système reçu a l'air

$$\begin{bmatrix} 30,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 375 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

La résolution de ce système nous donne  $\varphi_1 = 12,4 \text{ V}$ ,  $\varphi_2 = 6,2 \text{ V}$ .  
Définissons les courants dans les branches :

$$I_1 = \frac{E_1 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{01}} = \frac{12 + (0 - 12,4)}{0,05} = -7,98 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{E_2 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{02}} = \frac{13,5 + (0 - 12,4)}{0,1} = 11,08 \text{ A}, \quad I_3 = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R_2} = \frac{12,4 - 6,2}{2} = 3,1 \text{ A},$$

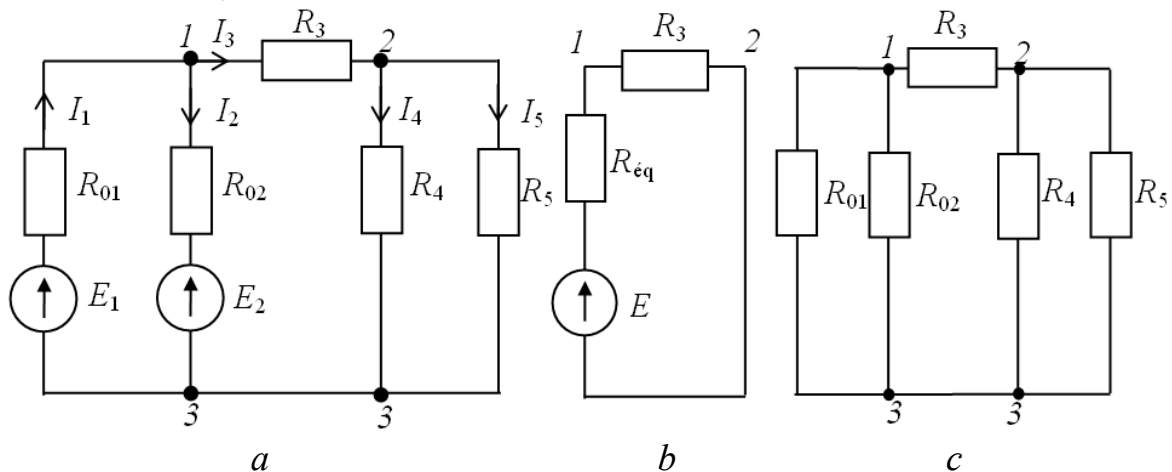
$$I_4 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_4} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ A}, \quad I_5 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_5} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ A}.$$

### Problème 23.9

Pour le schéma du circuit électrique et les données initiales du problème 23.6, en se servant de la méthode du générateur équivalent, calculer et construire les dépendances du courant à la branche avec la résistance  $R_3$  et de la tension  $U_{12}$  entre les noeuds 1 et 2 de la valeur de la résistance du résistor  $R_3$  au changement de sa résistance du zéro à 12 Ohm.

#### Résolution de problème de la variante K.

Dans ce cas la résistance intérieure du générateur équivalent est plus facile de calculer, sans définir le courant du court-circuit. Aux bornes ouvertes 1 et 2 et les sources de la F.E.M. en état de court-circuit nous aurons le schéma initial, montré sur la figure 23.9, c.



**Figure 23.9** – Transformation du schéma selon la méthode du générateur équivalent

Nous trouvons les résistances équivalentes de branches connectées aux noeuds 1-3 et 2-3 (fig. 23.9, c) :

$$R_{13} = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = \frac{0,05 \cdot 0,1}{0,05 + 0,1} = 0,033 \text{ } \Omega, \quad R_{23} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ } \Omega.$$

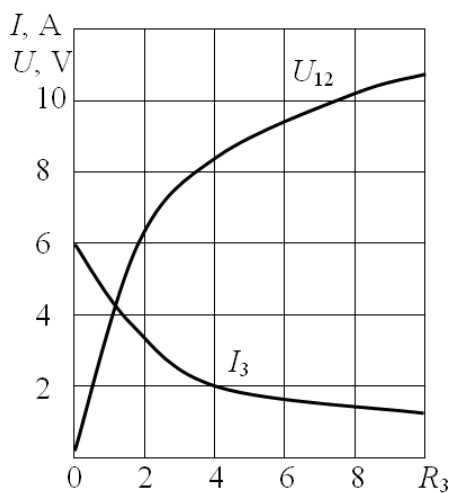
En ce qui concerne les noeuds 1 et 2 les résistances  $R_{13}$  et  $R_{23}$  sont insérés successivement, donc la résistance intérieure du générateur équivalent  $R_{\text{eq}} = 2,033 \Omega$ .

Pour définir la F.E.M. du générateur équivalent il faut calculer les potentiels au noeuds 1 et 2. Dans notre cas il est plus facile de définir ces potentiels en se servant de la méthode des potentiels de noeud. Ainsi, si accepter le potentiel du noeud 3 égal à zéro, aux bornes ouvertes les courants en branches avec les résistances  $R_4$  et  $R_5$  sont égaux à zéro. Donc le potentiel du noeud 2 est aussi égal à zéro.

Le potentiel du noeud 1 nous trouvons de l'équation (3.9) :

$$\varphi_1 = \frac{I_{\text{noeud1}}}{G_{11}} = \frac{375}{30} = 12,5 \text{ V},$$

$$\text{où } G_{11} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} = 30 \text{ S}, \quad I_{\text{noeud1}} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \text{ A}.$$



**Figure 23.10** – Dépendances cherchées du courant et de la tension

La f.é.m. du générateur équivalent

$$E_g = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 = 12,5 \text{ V}.$$

Le courant  $I_3$  dans la branche avec résistance  $R_3$  et la tension entre les noeuds 1 et 2

$$I_3 = E_g / (R_3 + R_{\text{eq}}),$$

$$U_{12} = R_3 \cdot I_3.$$

Des rapports reçus nous construirons les graphiques cherchés (fig. 23.10).

La résolution de ce problème par d'autres méthodes demande de grandes dépenses du temps.

## Chapitre 24 : CIRCUITS ÉLECTRIQUES À COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ

### Problème 24.1

Le courant change d'après la loi  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ . Définir son amplitude complexe et le courant efficace complexe. Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.1.

**Tableau 24.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_m, \text{ A}$	8	6	4	2	3	5	7	9	5	4	3
$\psi_i, \text{ rad}$	$\pi/18$	$-\pi/24$	$\pi/30$	$\pi/40$	$\pi/10$	$\pi/16$	$\pi/20$	$\pi/26$	$-\pi/14$	$\pi/22$	$\pi/28$

**Résolution de problème** de la variante K.

Pour le courant sinusoïdal avec l'amplitude  $I_m = 8$  A et une phase initiale  $\psi_i = \pi/18$  l'amplitude complexe du courant et le courant complexe sont égale en conséquence :

$$I_m = 8e^{j\frac{\pi}{18}} = 8(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}) = 7,88 + j1,39;$$

$$\dot{I} = \frac{8}{\sqrt{2}}e^{j\frac{\pi}{18}} \cong 5,7(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}) = 5,57 + j0,98.$$

**Problème 24.2**

L'amplitude complexe du courant  $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$ . Incrire l'expression pour le courant sinusoïdal, qui change avec la fréquence  $f$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.2.

**Tableau 24.2**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_m$ , A	25	23	21	19	17	15	13	9	7	5	3
$\psi_i$ , rad	$-\pi/12$	$-\pi/18$	$-\pi/22$	$\pi/20$	$\pi/30$	$\pi/26$	$-\pi/20$	$\pi/16$	$\pi/24$	$\pi/14$	$\pi/18$
$f$ , Hz	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50	50

**Résolution de problème** de la variante K.

La fréquence angulaire du courant  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$  1/s.

Pour passer de l'amplitude complexe vers la signification instantanée du courant il faut l'amplitude complexe  $\dot{I}_m = 25e^{-j\frac{\pi}{12}}$  multiplier sur  $e^{j\omega t} = e^{j314t}$  et prendre la partie imaginaire du nombre complexe reçu

$$i = \text{Im}(25e^{-j\pi/12} e^{j314t}) = \text{Im}(25e^{j(314t - \pi/12)}) = 25\sin(314t - \pi/12).$$

**Problème 24.3**

Dans un réseau du courant alternatif de tension  $U$  et de fréquence  $f$  on insère une bobine idéale avec l'auto-inductance  $L$  ( $R_{\text{bobine}} = 0$ ). Définir la puissance réactive  $Q$  de la bobine, l'énergie  $W_{Lm}$  de champ magnétique de la bobine. Incrire l'expression pour les significations instantanées : de la tension  $u$ , du courant  $i$ , de la f.é.m. d'inductance propre  $e$ , de la puissance instantanée  $p$  et de la puissance moyenne  $P$  pour la période, si la phase initiale de la tension est égale  $\psi_u$ . Construire les diagrammes temporaires et vectoriels. Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.3.

**Tableau 24.3**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U$ , V	120	110	100	90	80	70	120	110	100	90	80
$f$ , Hz	50	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50
$L$ , mH	9	7	5	6	8	9	7	5	6	8	10
$\psi_u$ , rad	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$

**Résolution de problème** de la variante K.

Inductance de la bobine :  $X_L = \omega L = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,009 = 3 \, \Omega$ .

Valeur efficace du courant :  $I = U/X_L = 120/3 = 40 \, \text{A}$ .

Puissance réactive du réseau :  $Q = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800 \, \text{var}$ .

Energie maximale de champ magnétique de la bobine

$$W_{Lm} = L \cdot I^2 = 0,009 \cdot 40^2 = 14,4 \, \text{J}.$$

Valeur de l'amplitude de la tension

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = 1,41 \cdot 120 = 169,2 \, \text{V},$$

et du courant

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I = 1,41 \cdot 40 = 56,4 \, \text{A}.$$

Valeurs instantanées :

de la tension  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = 169,2 \cdot \sin(3,14t + \pi/2)$ , V ;

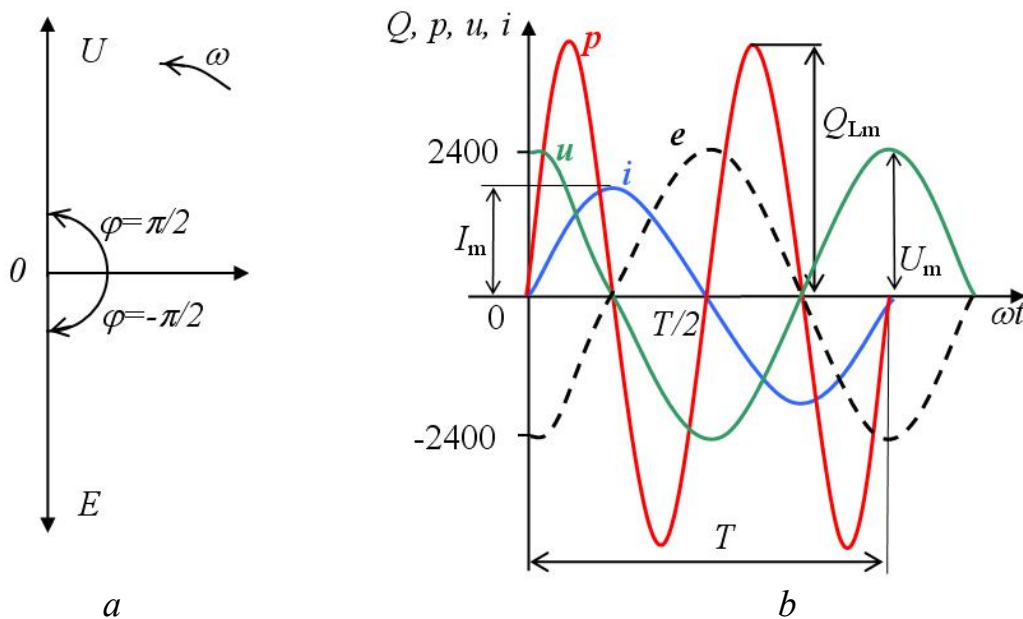
du courant  $i = I_m \cdot \sin \omega t = 56,4 \cdot \sin 3,14t$ , A ;

f.é.m. d'inductance propre de la bobine  $e = -u = 169,2 \cdot \sin(3,14t - \pi/2)$ , V ;

puissance du réseau

$$p = u \cdot i = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) \cdot I_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \cos \omega t \cdot I_m \cdot \sin \omega t = \\ = U_m \cdot I_m \cdot \sin 2\omega t / 2,$$

puisque  $\sin(\omega t + \pi/2) = \cos \omega t$ , et  $\sin 2\omega t = 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t$ .



**Figure 24.1** – Diagramme vectoriel (a) et graphiques des valeurs instantanées (b) de la tâche 24.3

Pour les valeurs efficaces de la tension et du courant :

$$p = u \cdot i = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 120 \cdot 40 \cdot \sin(2 \cdot 3,14 \cdot t) = 4800 \cdot \sin 6,28t, \, \text{VA}.$$

Puissance moyenne pour une période :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot \sin 2\omega t \cdot dt = 0.$$

Diagramme vectoriel pour les valeurs efficaces de la tension et du courant est amené sur la figure 24.1, a.

Le graphique du changement de la puissance instantanée représente la sinusoïde avec une fréquence double et l'amplitude  $Q_{Lm}$  (fig. 24.1, b). De plus la puissance réactive

$$Q_L = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ var.}$$

#### Problème 24.4

Au réseau du courant alternatif de la tension  $U$  et la fréquence  $f$  est connecté un condensateur de la capacité  $C$  ( $R_C=0$ ). Définir la résistance réactive (capacitance) du condensateur  $Q_C$ , le courant  $i$ , la puissance réactive  $Q_C$ , l'énergie maximale  $W_{Cm}$  du champ électrique du condensateur. Inscrire les expressions pour les significations instantanées du courant  $i$  et de la puissance instantanée  $p$ . Construire les diagrammes temporaires et vectoriels. Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.4.

Tableau 24.4

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, V$	220	220	220	210	210	210	127	127	127	120	120
$f, Hz$	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50	50
$C, mF$	20	18	14	10	20	18	14	10	16	20	30
$\psi_u, rad$	0	0	0	30	30	30	60	60	60	157	157

**Résolution de problème** de la variante K.

La résistance réactive du condensateur (capacitance) :

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 160 \Omega.$$

Le courant dans la chaîne du condensateur :

$$I = U / X_C = 220 / 160 = 1,37 \text{ A.}$$

La puissance réactive de la chaîne :

$$Q_C = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ var.}$$

L'énergie maxima, qui fait provision dans le champ électrique du condensateur

$$W_{Cm} = C \cdot U^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 220^2 = 968 \cdot 10^{-3} \text{ J.}$$

La valeur instantanée du courant au circuit :

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \pi / 2) = I_m \cdot \cos \omega t.$$

La puissance instantanée au circuit :

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = U_m \cdot I_m \frac{\sin 2\omega t}{2},$$

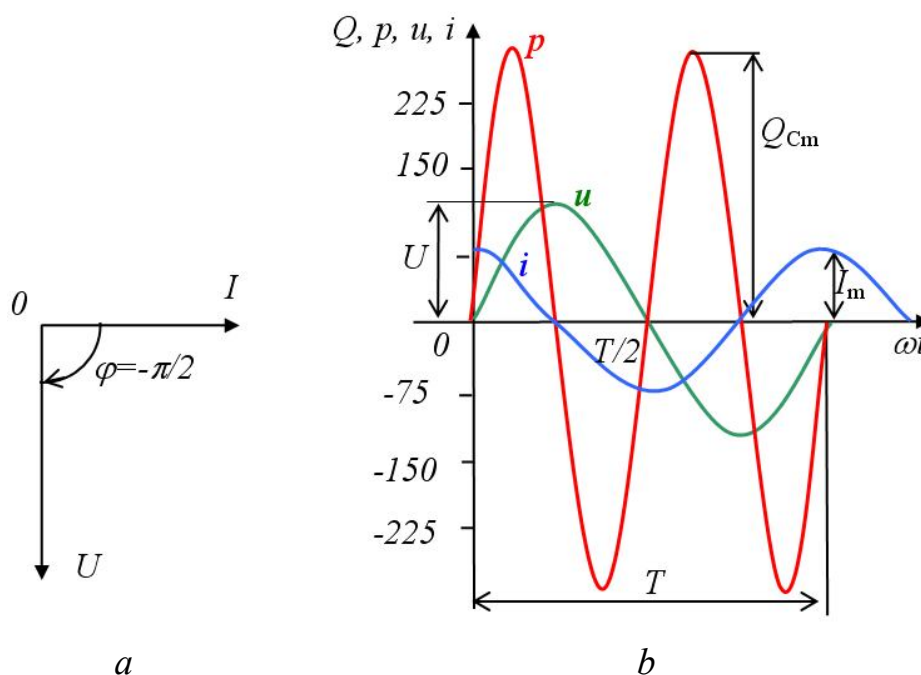
ou pour les valeurs efficaces du courant et de la tension

$$p = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 220 \cdot \frac{220}{160} \cdot \sin(2 \cdot 314t) = 302 \sin 628t.$$

Le diagramme vectoriel du courant et de la tension sont amenés sur la figure 24.2, *a*.

Les graphiques temporaires de la tension, du courant et de la puissance sont amenés sur la figure 23.2, *b*. Le graphique du changement de la capacité instantanée dans le temps représente la sinusoïde avec la fréquence double et l'amplitude, qui est égale à la puissance réactive :

$$Q_{Cm} = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ var.}$$



**Figure 24.2** – Diagramme vectoriel (*a*) et graphiques des valeurs instantanées (*b*) de la tâche 24.4

### Problème 24.5

Dans un réseau du courant alternatif la tension  $U$  et le courant  $I$  changent selon les expressions :  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ , V ;  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ , A. Définir les puissances du réseau : active  $P$ , réactive  $Q$  et apparente  $S$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.5

**Tableau 24.5**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_m, V$	28,2	32	30	26	24	25	27	29	31	33	35
$\omega, 1/s$	628	628	628	314	314	314	314	314	628	628	628
$\psi_u, \text{rad}$	$4\pi/9$	$4\pi/9$	$4\pi/9$	$2\pi/9$	$2\pi/9$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/4$
$I_m, A$	2,82	2,6	2,4	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,0	2,8
$\psi_i, \text{rad}$	$5\pi/18$	$5\pi/18$	$\pi/30$	$\pi/40$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/8$	$2\pi/8$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/8$

**Résolution de problème** de la variante K.

La valeur instantanée de la puissance du circuit :

$$\begin{aligned}
 p &= u \cdot i = 28,2 \sin\left(628t + \frac{4\pi}{9}\right) \cdot 28,2 \sin\left(628t + \frac{5\pi}{18}\right) = \\
 &= 28,2 \cdot 28,2 \left\{ \frac{1}{2} [\cos(628t + 4\pi/9 - 628t - 5\pi/18) - \cos(628t + 4\pi/9 + 628t + 5\pi/18)] \right\} = \\
 &= 79,5 \left\{ \frac{1}{2} [\cos \pi/6 - \cos(1225t + 13\pi/18)] \right\},
 \end{aligned}$$

ou pour les valeurs efficaces du courant et de la tension :

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{28,2 \cdot 28,2}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2} [\cos \pi/6 - \cos(1225t + 13\pi/18)] = \\
 &= 19,8 \cos \pi/6 - 19,8 \cos(1225t + 13\pi/18).
 \end{aligned}$$

Puissance du circuit :

$$\text{active } P = 19,8 \cos \pi/6 = 19,8 \frac{\sqrt{3}}{2} = 17,1 \text{ W ;}$$

$$\text{réactive } Q = 19,8 \sin \pi/6 = 19,8 \frac{1}{2} = 9,9 \text{ var ;}$$

$$\text{apparente } S = U \cdot I = 19,8 \text{ VA.}$$

### Problème 24.6

La valeur efficace de la tension mis à un circuit électrique (fig. 24.3)  $U$ , la fréquence de la tension  $f$ , la résistance  $R$ , l'inductance de la bobine  $L$ , la capacité du condensateur  $C$ . En appliquant la méthode complexe, trouver les valeurs efficaces des courants dans les branches du circuit et les tensions sur ses éléments, les puissances du circuit : apparente –  $S$ , actif –  $P$  et réactif –  $Q$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 24.6.

**Tableau 24.6**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, \text{ V}$	100	110	120	130	100	110	120	130	90	90	80
$f, \text{ Hz}$	50	50	50	50	60	60	60	60	60	50	50
$R, \Omega$	10	14	16	18	22	20	17	15	13	12	11
$L, \text{ mH}$	31,8	30	28	26	27	29	32	34	30	29	27
$C, \mu\text{F}$	318,5	310	300	280	260	250	270	290	300	310	305

**Résolution de problème** de la variante K.

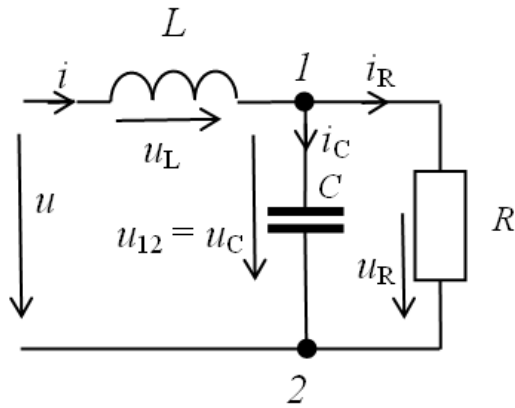
Ayant accepté la phase initiale de la tension égale à zéro, pour un complexe de la tension nous pouvons inscrire

$$\dot{U} = 100e^{j0} = 100.$$

Les résistances complexes de la bobine inductive et du condensateur :

$$\underline{Z}_L = jX_L = j\omega L = j314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = j10 = 10e^{j\frac{\pi}{2}},$$





**Figure 24.3** – Schéma du circuit au problème 24.6

$$\underline{Z}_C = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{314 \cdot 318,5 \cdot 10^{-6}} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}},$$

où la fréquence angulaire  $\omega = 2\pi f = 314 \text{ c}^{-1}$ .

Pour définir les courants complexes on peut se servir de n'importe quelle méthode connue de calcul des circuits électriques, par exemple, par la méthode des potentiels de noeud. Soit le potentiel complexe du noeud

2 est égal à zéro  $\varphi_2 = 0$ , alors  $\underline{Y}_{11} \cdot \dot{\varphi}_1 = \dot{I}_{11}$ ,

d'où

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{I}_{11}}{\underline{Y}_{11}} = \frac{-j10}{0,1} = -j100 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}},$$

où une admittance complexe et le courant complexe du noeud 1 sont égale en conséquence :

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{R} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{(-j10)} + \frac{1}{10} = -j0,1 + j0,1 + 0,1 = 0,1 ;$$

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{11}} = \frac{100}{j10} = -j10.$$

Les courants complexes dans les branches :

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} - \dot{\varphi}_1}{\underline{Z}} = \frac{100 + j100}{j10} = \frac{100\sqrt{2}e^{j\frac{\pi}{4}}}{10e^{j\frac{\pi}{2}}} = 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{\varphi}_1}{\underline{Z}_C} = \frac{-j100}{-j10} = 10 ; \quad \dot{I}_R = \frac{\dot{\varphi}_1}{R} = \frac{-j100}{10} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Les valeurs efficaces des courants :  $I = 14,1 \text{ A}$  ;  $I_R = I_C = 10 \text{ A}$ .

Les tensions complexes sur la bobine inductive, le condensateur et le résistor :

$$\dot{U}_L = \underline{Z}_L \cdot \dot{I} = 10e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 141,2e^{j\frac{\pi}{4}} ;$$

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}_R = 10 \cdot 10e^{-j\frac{\pi}{2}} = 100e^{-j\frac{\pi}{2}} ;$$

$$\dot{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \dot{I}_C = 10e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot 10 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Les valeurs efficaces des tensions :  $U_L = 141,2 \text{ V}$  ;  $U_C = U_R = 100 \text{ V}$ .

La puissance complexe

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = 100 \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 1410(\cos \frac{\pi}{4} + j \sin \frac{\pi}{4}) = 1000 + j1000.$$

Les puissances apparente, active et réactive

$$S = |\underline{S}| = 1410 \text{ VA}, \quad P = \text{Re}(\underline{S}) = 1000 \text{ W}, \quad Q = \text{Im}(\underline{S}) = 1000 \text{ var}.$$

### Problème 24.7

Pour un circuit électrique du courant alternatif (fig. 24.4, a) définir les déclarations des ampèremètres A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, les angles du déphasage  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  entre les courants correspondants, et les tensions. Construire le diagramme vectoriel des courants et des tensions. Les données initiales (tension d'alimentation  $U$ , les résistances active et réactive du circuit) sont amenées dans le tableau 24.7.

Tableau 24.7

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, \text{V}$	120	110	100	90	80	86	94	104	114	124	136
$R_1, \Omega$	2	1,6	1,4	1,4	1,8	2	2,1	2,2	2,6	2,9	3,2
$R_2, \Omega$	1	0,8	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	1,6	1,4	1,1	2,0
$X_L, \Omega$	6	5	4	5	6	7	6	5	4	7	8
$X_C, \Omega$	9,95	9	8	7	10	12	8	9	7	10	9

**Résolution de problème** de la variante K.

Impédance des branches du circuit :

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{2^2 + 6^2} = 6,32 \text{ } \Omega; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{1^2 + 9,95^2} = 10 \text{ } \Omega.$$

Les angles du déphasage entre les courants et les tensions des branches correspondantes parallèles :

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{2}{6,32} = 0,316; \quad \varphi_1 = 71^\circ 35';$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{1}{10} = 0,1; \quad \varphi_2 = -84^\circ 15'.$$

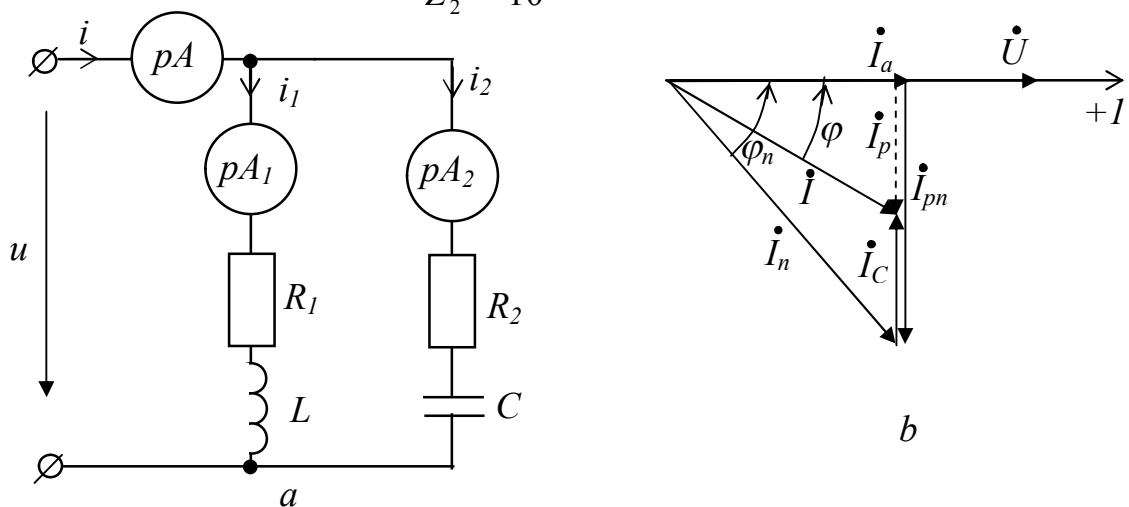


Figure 24.4 – À problème 24.7: a – schéma du circuit ;  
b – diagrammes vectoriels de la variant K

Les déclarations des ampèremètres  $A_1$  et  $A_2$  dans les branches parallèles :

$$I_1 = U/Z_1 = 120/6,32 = 19 \text{ A} ; I_2 = U/Z_2 = 120/10 = 12 \text{ A}.$$

Les composantes actives des courants dans les branches parallèles :

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos\varphi_1 = 19 \cdot 0,316 = 6,01 \text{ A}, I_{a2} = I_2 \cdot \cos\varphi_2 = 12 \cdot 0,1 = 1,2 \text{ A}.$$

Les composantes réactives des courants dans les branches parallèles :

$$I_{r1} = I_1 \cdot \sin\varphi_1 = I_1 \cdot X_L/Z_1 = 19 \cdot 6/6,32 = 18,01 \text{ A} ; \\ I_{r2} = I_2 \cdot \sin\varphi_2 = I_2 \cdot X_C/Z_2 = 12 \cdot 9,95/10 = 11,93 \text{ A}.$$

Les composantes actives et réactives du courant  $i$  :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 6,01 + 1,2 = 7,21 \text{ A} ; I_r = I_{r1} + I_{r2} = 18,01 + 11,93 = 30,04 \text{ A}.$$

Le courant total du circuit :

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{7,21^2 + 30,04^2} = 30,8 \text{ A}.$$

L'angle du déphasage entre le courant  $I$  et la tension  $U$  :

$$\cos\varphi = I_a/I = 7,21/30,8 = 0,234 ; \varphi = 63^\circ 10'.$$

Le diagramme vectoriel des courants et des tensions pour les résultats acquis est amené sur la figure 24.4, *b*.

### Problème 24.8

Résoudre le problème de 24.7 par la méthode des admittances.

**Résolution de problème** de la variante K.

Les valeurs d'impédances  $Z_1$  et  $Z_2$ , des courants  $I_1$  et  $I_2$ , des facteurs de puissance  $\cos\varphi_1$  et  $\cos\varphi_2$  nous définissons par méthode exposée dans le problème 24.7.

Les admittances actives et réactives des branches parallèles :

$$G = G_1 + G_2 = \frac{R_1}{Z_1^2} + \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{2}{6,32^2} + \frac{1}{10^2} = 0,06 \text{ S} ; \\ B = B_1 + B_2 = \frac{X_L}{Z_1^2} - \frac{X_C}{Z_2^2} = \frac{6}{6,32^2} - \frac{9,95}{10^2} = 0,05 \text{ S}.$$

L'admittance de tout le circuit :

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,06^2 + 0,05^2} = 0,0784 \text{ S}.$$

Le courant total à la chaîne :  $I = U \cdot Y = 120 \cdot 0,0784 = 9,4 \text{ A}$ .

L'angle du déphasage entre le courant  $I$  et la tension  $U$  :

$$\cos\varphi = G/Y = 0,06/0,0784 = 0,765 ; \varphi = 40^\circ 10'.$$

### Problème 24.9

Définir les puissances active  $P$ , réactive  $Q$  et apparente  $S$  du circuit électrique (fig. 24.5). Les significations des courants  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , et valeurs des résistances active  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et réactive  $X_L$  et  $X_C$  sont amenées dans le tableau 24.8.

Tableau 24.8

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_1, \text{ A}$	5	5	5	4	4	4	3	3	3	5	5
$I_2, \text{ A}$	3	3	3	2	2	2	1	1	1	2	2
$I_3, \text{ A}$	4	4	4	5	5	5	4	4	4	3	3
$R_1, \Omega$	10	10	10	9	9	9	8	8	8	7	7
$R_2, \Omega$	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3
$R_3, \Omega$	5	5	5	6	6	6	7	7	7	5	5
$X_L, \Omega$	8	8	8	7	7	7	6	6	6	8	8
$X_C, \Omega$	5,6	5	5	6	6	6	7	7	7	5	5

**Résolution de problème** de la variante K.

Puissance active du circuit

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I_1^2 \cdot R + I_2^2 \cdot R + I_3^2 \cdot R = 5^2 \cdot 20 + 3^2 \cdot 6 + 4^2 \cdot 5 = 384 \text{ W.}$$

Puissance réactive du circuit :

$$Q = Q_L - Q_C = I_2^2 \cdot X_L - I_3^2 \cdot X_C = 32 \cdot 8 - 42 \cdot 5,6 = -17,6 \text{ var.}$$

Puissance apparente du circuit :  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{384^2 + (-17,6)^2} = 385 \text{ VA.}$

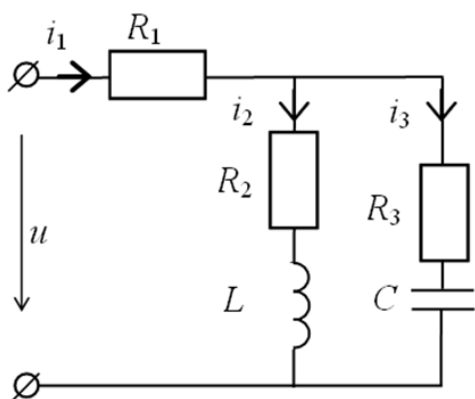


Figure 24.5 – Schema du circuit au problème 24.9

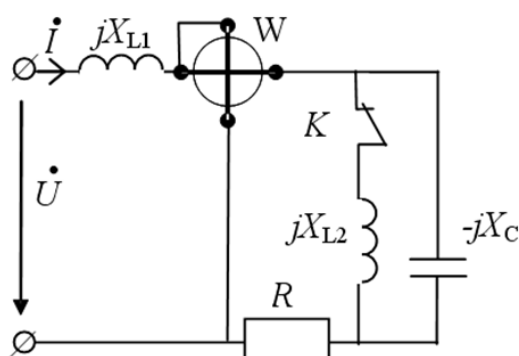


Figure 24.6 – Schema du circuit au problème 24.10

### Problème 24.10

Définir la lecture du wattmètre W dans un circuit électrique (fig. 24.6) à l'interrupteur K fermé et ouvert. La tension de la source d'alimentation  $U$ , les résistances active  $R$  et réactive  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$  et  $X_C$  sont données dans le tableau 24.9.

Tableau 24.9

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, \text{ V}$	100	100	110	110	120	120	130	130	90	90	90
$R, \Omega$	5	4	3	6	5	4	7	6	5	4	3
$X_{L1}, \Omega$	5	5	4	4	6	6	5	5	4	4	6
$X_{L2}, \Omega$	5	4	3	6	7	5	7	8	5	5	4
$X_C, \Omega$	5	5	4	4	6	6	5	6	5	4	3

**Résolution de problème** de la variante K.

Dans ce cas dans la chaîne électrique il y a une résonance des tensions.

En cas l'interrupteur K est ouvert. L'impédance du circuit :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (5 - 5)^2} = 5 \, \Omega.$$

Le courant du circuit :  $I = U/Z = 100/5 = 20 \, \text{A}$

La lecture du wattmètre :  $P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 20^2 = 2000 \, \text{W} = 2 \, \text{kW}$ .

En cas l'interrupteur K est fermé. La lecture du wattmètre :

$$P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 0 = 0 \, \text{W}.$$

Puisque sur la section parallèle il a lieu une résonance des courants et le courant dans la résistance  $R$  ne passe pas.

## Chapitre 25 : CIRCUITS ÉLECTRIQUES TRIPHASÉ

### Problème 25.1

Un récepteur symétrique de l'énergie électrique est connectés au générateur triphasé (fig. 25.1). Définir la tension simple du générateur ; les courants, les tensions simples et composée du récepteur, la chute de potentiel dans les fils linéaires, la puissance du récepteur. Construire le diagramme vectoriel des tensions et des courants. Dans le tableau 25.1 on amène les données initiales pour la décision de la tâche : la tension composée du générateur  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{lign}}$ , la résistance des fils  $\underline{Z}_{\text{fil}} = R_{\text{fil}} + jX_{\text{fil}}$  et la résistance du récepteur  $\underline{Z} = R + jX$ .

**Tableau 25.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{lign}}, \text{V}$	220	220	220	220	220	220	380	380	380	380	380
$R_{\text{fil}}, \Omega$	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8	0,8	1	1,2	1,2
$X_{\text{fil}}, \Omega$	1	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2	1,2	1,4	1,2	1,0	1,4
$R, \Omega$	10	12	12	12	10	14	18	20	22	22	24
$X, \Omega$	6	6	8	6	8	8	10	12	14	16	16

**Résolution de problème** de la variante K.

Nous décidons ce problème par la méthode des nombres complexes.

Le mode du circuit triphasée est symétrique, c'est pourquoi la tension entre les points neutres  $U_N = 0$ .

En cas du système symétrique des tensions composées (de lignes) du générateur la tension simple (de phase) est égal

$$U_{ph} = U_{\text{lign}} / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \, \text{V}.$$

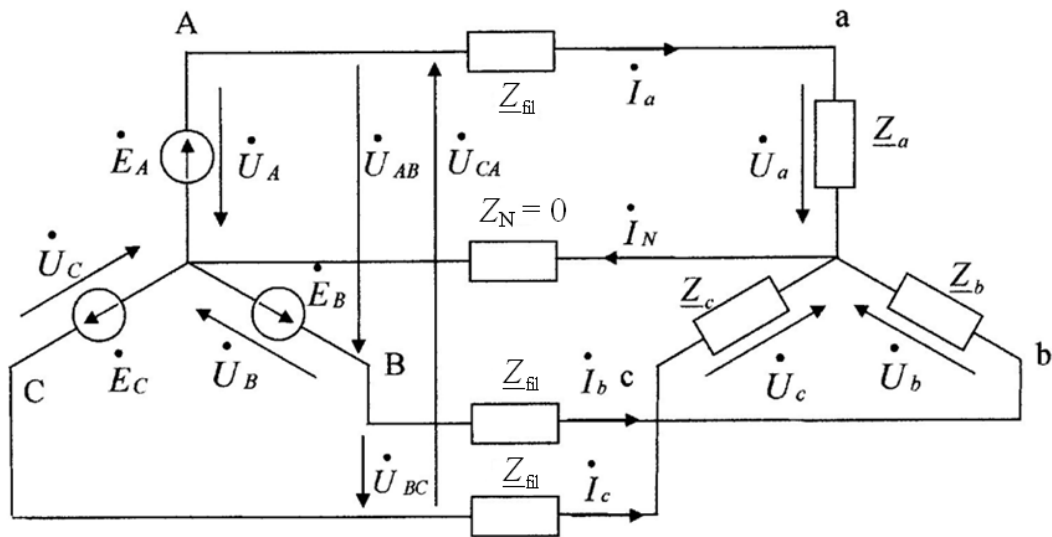


Figure 25.1 – Schema du circuit au problème 25.1

Le système des tensions complexes des phases du générateur, si on accepte la tension  $\dot{U}_A$  comme une valeur réelle (sans la partie imaginaire) :

$$\dot{U}_A = 127, \quad \dot{U}_B = 127e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ}.$$

Les impédances et admittances complexes des phases

$$\underline{Z}_{ph} = \underline{Z} + \underline{Z}_{fil} = (10 + j6) + (0,5 + j1) = 10,5 + j7 = 12,6e^{j34^\circ},$$

$$\underline{Y}_{ph} = \frac{1}{\underline{Z}_{ph}} = \frac{1}{12,6e^{j34^\circ}} = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^\circ} = (6,6 - j4,4) \cdot 10^{-2}.$$

Puisque les systèmes des tensions simples et composées du générateur sont symétriques, les systèmes triphasés des tensions et des courants simples et composés du récepteur sont aussi symétriques.

Les courants des phases du récepteur :

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \cdot \underline{Y}_a = 127 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^\circ} = 10 \cdot e^{-j34^\circ},$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_a \cdot e^{-j120^\circ} = 10 \cdot e^{-j154^\circ}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}_a \cdot e^{j120^\circ} = 10 \cdot e^{j86^\circ}.$$

Les valeurs efficaces des courants des phases  $I_a = I_b = I_c = 10$  A.

Les tensions des phases du récepteur :

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_a = 10 \cdot e^{-j34^\circ} (10 + j6) = 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot 11,7 \cdot e^{j31^\circ} = 117 \cdot e^{-j3^\circ};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_a \cdot e^{-j120^\circ} = 117 \cdot e^{-j123^\circ}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_a \cdot e^{j120^\circ} = 117 \cdot e^{j117^\circ}.$$

Les valeurs efficaces des tensions des phases du récepteur :

$$U_a = U_b = U_c = 117 \text{ V.}$$

Les tensions composées sur le récepteur :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = 117 \cdot e^{-j3^\circ} - 117 \cdot e^{-j123^\circ} = 116,8 - j6,1 - (64,8 - j98,1) = \\ &= 180 + j92 = 202 \cdot e^{j27^\circ};\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 202 \cdot e^{j27^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 202 \cdot e^{-j93^\circ};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 202 \cdot e^{j27^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 202 \cdot e^{j147^\circ}.$$

La chute des tensions dans les fils des lignes :

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_{\text{fil}} = 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{j29^\circ};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_b \cdot \underline{Z}_{\text{fil}} = 10 \cdot e^{-j154^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j154^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{-j91^\circ};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_c \cdot \underline{Z}_{\text{fil}} = 10 \cdot e^{j86^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{j86^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{j149^\circ}.\end{aligned}$$

Les puissances des phases du récepteur : apparentes, actives et réactives :

$$\underline{S}_{\text{ph}} = \underline{S}_a = \underline{S}_b = \underline{S}_c = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* = 117 \cdot e^{-j3^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j34^\circ} = 1170 \cdot e^{j31^\circ} = 1003 + j603;$$

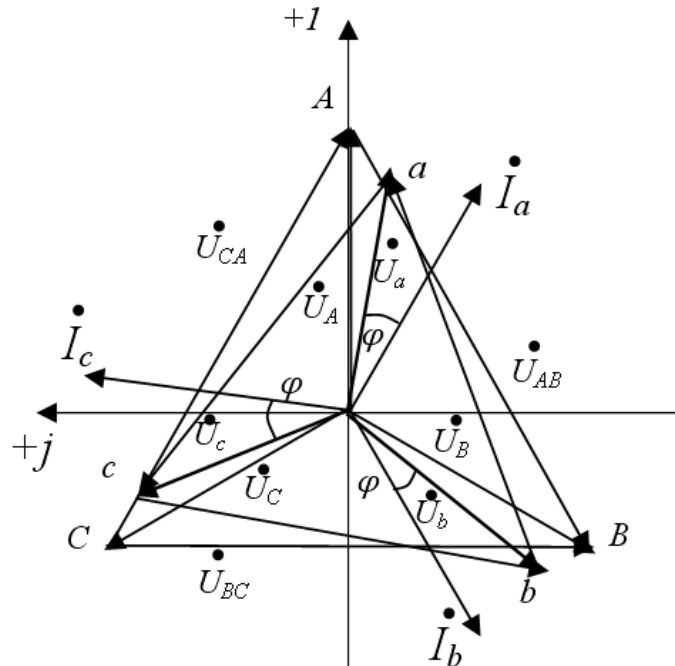
$$S_{\text{ph}} = 1170, \text{ BA} ; P_{\text{ph}} = 1003, \text{ W} ; Q_{\text{ph}} = 603, \text{ var.}$$

La puissance du récepteur : apparente, active et réactive :

$$\underline{S} = \sum \underline{S}_{\text{ph}} = 3 \sum \underline{S}_{\text{ph}} = 3510 \cdot e^{j51^\circ} = 3009 + j1809.$$

$$S = 3510 \text{ BA} ; P = 3010 \text{ W} ; Q = 1810 \text{ var.}$$

Le diagramme vectoriel des tensions et des courants est amené sur la figure 25.2.



**Figure 25.2** – Diagramme vectoriel des courants et des tensions au problème 25.1

## Problème 25.2

Un consommateur triphasé de l'énergie électrique avec les résistances actives et réactives  $R_{ab}$ ,  $R_{bc}$ ,  $R_{ca}$ ,  $X_{ab}$ ,  $X_{bc}$ ,  $X_{ca}$ , qui sont couplées en « triangle », (fig. 25.3), est connecté au réseau triphasé symétrique avec une tension de ligne  $U_{\text{ligne}}$ . Définir les courants de phases  $I_{\text{ph}}$  et de lignes  $I_{\text{ligne}}$ , les puissances – actif  $P$ , réactif  $Q$  et apparente  $S$  de chaque phase et tout le circuit électrique. Construire le diagramme vectoriel des courants et les tensions. Les données initiales sont amenées dans le tableau 25.2.

Tableau 25.2

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{ligne}}, \text{V}$	220	220	220	220	127	127	127	127	100	100	100
$R_{ab}, \Omega$	10	12	14	10	10	14	14	10	8	10	10
$X_{ab}, \Omega$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{bc}, \Omega$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10
$X_{bc}, \Omega$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10
$R_{ca}, \Omega$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10
$X_{ca}, \Omega$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10

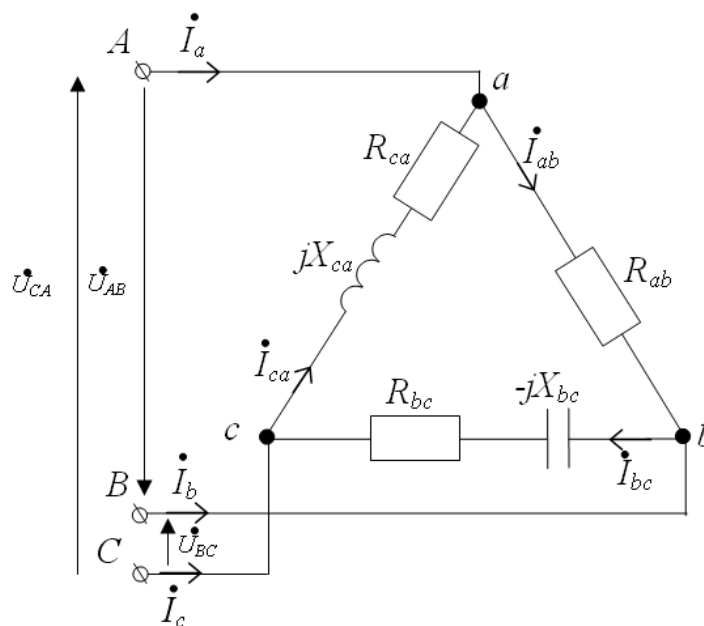


Figure 25.3 – Schema du circuit au problème 25.2

**Résolution de problème** de la variante K.

Les courants des phases du consommateur :

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} = \frac{220}{10} = 22, \text{ A} ;$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{U_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11, \text{ A} ;$$



$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{U_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11 \text{ , A.}$$

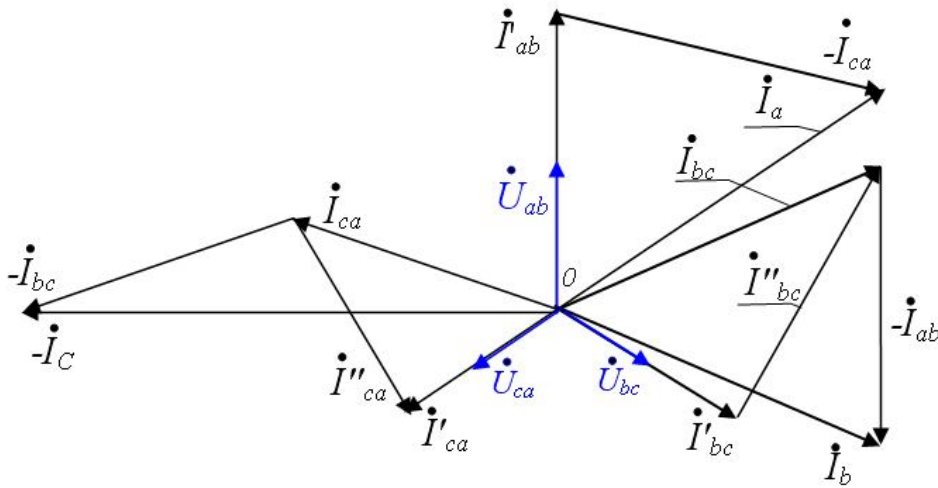
Le diagramme vectoriel des courants et des tensions en tenant compte du caractère de la charge est montré sur la figure 25.4.

Les composantes actives des courants des phases :

$$I'_{ab} = I_{ab} \cos \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{10}{\sqrt{10^2 + 0}} = 22 \text{ , A ;}$$

$$I'_{bc} = I_{bc} \cdot \cos \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ , A ;}$$

$$I'_{ca} = I_{ca} \cdot \cos \varphi_{ca} = I_{ca} \frac{R_{ca}}{Z_{ca}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ , A.}$$



**Figure 25.4** – Diagramme vectoriel des courants et des tensions au problème 25.2

Les composantes réactives des courants des phases :

$$I''_{ab} = I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{0}{\sqrt{5^2 + 0}} = 0 \text{ ;}$$

$$I''_{bc} = I_{bc} \cdot \sin \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ , A ;}$$

$$I''_{ca} = I_{ca} \cdot \sin \varphi_{ac} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{Z_{ca}} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ , A.}$$

Les courants de lignes du consommateur de l'énergie électrique est défini selon le diagramme vectoriel (fig. 25.4).

Les puissances actives des phases du consommateur :

$$P_{ab} = U_{ab} \cdot I'_{ab} = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ , W ;}$$

$$P_{bc} = U_{bc} \cdot I'_{bc} = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ , W ;}$$

$$P_{ca} = U_{ca} \cdot I'_{ca} = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ , W.}$$

Les puissances réactives des phases du consommateur :

$$Q_{ab} = U_{ab} \cdot I''_{ab} = 220 \cdot 0 = 0 ;$$

$$Q_{bc} = U_{bc} \cdot I''_{bc} = 220 \cdot 22 = -4840 \text{ var} ;$$

$$Q_{ca} = U_{ca} \cdot I''_{ca} = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ var}.$$

Les puissances apparentes des phases du consommateur :

$$S_{ab} = P_{ab} = U_{ab} \cdot I'_{ab} = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ BA} ;$$

$$S_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc} = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ BA} ;$$

$$S_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca} = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ BA}.$$

Les puissances de tout le circuit :

active  $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 4840 + 4840 + 4840 = 14520 \text{ , W} ;$

réactive  $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = 0 - 4840 + 4840 = 0 \text{ var} ;$

apparente  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{14520^2 + 0^2} = 14520 \text{ VA} = 14,52 \text{ kVA}.$

## Chapitre 26 : MESURES ÉLECTRIQUES

### Problème 26.1

D'après les données du tableau 26.1 définir les plus grandes erreurs absolue et relative de mesure d'une tension avec un voltmètre de la classe de l'exactitude de  $K_{\text{exact}}$  avec une limite supérieure de la mesure  $U_{\text{max}}$ , si la déclaration de l'appareil  $U_x$ , V. Trouver la plus petite valeur de la tension  $U_{\text{min}}$ , que l'on peut mesurer avec le voltmètre donné à la plus grande erreur admissible de la mesure  $\pm 10 \%$ .

**Tableau 26.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{\text{exact}}$	2,5	1,5	1,0	0,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0,2	0,2	1,0
$U_{\text{max}}, \text{V}$	150	300	150	150	300	150	150	300	100	150	300
$U_x, \text{V}$	90	210	110	80	250	60	120	240	60	70	220

**Résolution de problème** de la variante K.

Puisque la classe de l'exactitude du voltmètre est donnée en forme du nombre 2,5 et est défini par la plus grande erreur réduite, nous définirons la plus grande erreur absolue selon le rapport (8.4) :

$$\Delta X = \frac{\gamma \cdot X_R}{100} = \pm \frac{2,5 \cdot 150}{100} = \pm 3,75 \text{ V}.$$

La plus grande erreur relative de mesure nous définirons selon le rapport (8.2) :

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% = \frac{\pm 3,75 \cdot 100\%}{90} = \pm 4,17\%.$$

La plus petite valeur de la tension qui peut être mesurée avec le voltmètre donné à la plus grande erreur admissible  $\pm 10\%$ , nous trouverons en se servant du rapport (8.5) :

$$U_{\min} = \frac{\gamma \cdot U_{\max}}{\delta} = \frac{2,5 \cdot 150}{10} = 37,5 \text{ V}.$$

### Problème 26.2

Avec un voltmètre numérique de la classe de l'exactitude c/d est mesuré la tension  $U_x$  sur la limite de la mesure  $U_{\max}$ . Définir les plus grandes erreurs de mesure absolue et relative. Inscrire le résultat avec l'erreur reçue. Les données initiales sont amenées dans le tableau 26.2.

Tableau 26.2

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>c/d</i>	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0
$U_{\max}, \text{V}$	99,9	100	100	150	150	150	150	300	300	300	300
$U_x, \text{V}$	50,2	64,8	78,4	110	69	135	48,3	179	246	261	285

**Résolution de problème** de la variante K.

La plus grande erreur relative de mesure par l'appareil, dont la classe de l'exactitude est donnée en forme du rapport c/d, est définie selon le rapport (8.6)

$$\delta = \pm \left[ c + d \left( \frac{U_{\max}}{U} \right) - 1 \right] \% = \pm \left[ 0,2 + 0,1 \left( \frac{99,9}{50,2} - 1 \right) \right] \% = \pm 0,299 \text{ \%}.$$

La plus grande erreur absolue de mesure est définie selon le rapport (8.2)

$$\Delta U = \frac{\delta \cdot U}{100} = \pm \frac{0,299 \cdot 50,20}{100} = \pm 0,1501 \text{ V}.$$

Le résultat de mesure avec l'erreur indiquée est

$$U_0 = U - \Delta U = 50,20 \pm 0,15 \text{ V}.$$

### Problème 26.3

La limite de la mesure du courant par l'ampèremètre avec le shunt est égale  $I_{\max}$ . Le shunt est accompli à la base de milliampèremètre magnéto-électrique avec la résistance  $R_{\text{app}}$ , la limite des mesures  $I_{\text{app.max}}$  et l'échelle à  $\alpha_{\text{app}}$  des divisions. Définir la résistance du shunt  $R_{\text{sh}}$  et le courant  $I$  (voir figure 7.10) dans le circuit, si la flèche de l'ampèremètre s'est écartée sur  $\alpha_x$  des divisions. Les données initiales sont amenées dans le tableau 26.3.

Tableau 26.3

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{\max}$ , A	2,5	2,5	2,5	5	5	5	5	10	10	10	10
$R_{app}$ , $\Omega$	0,4	0,6	0,4	1	1	1	1	2	2	2	2
$I_{app.\max}$ , mA	500	250	500	250	250	500	500	250	250	500	500
$\alpha_{app}$ , divisions	50	50	100	50	50	100	100	75	75	150	150
$\alpha_x$ , divisions	40	30	60	40	45	60	80	50	60	80	120

**Résolution de problème** de la variante K.

Multiplicateur de shuntage (7.13) :  $p = \frac{I_{\max}}{I_{app.\max}} = \frac{2,5}{500 \cdot 10^{-3}} = 5.$

Résistance du shunt (7.14) :  $R_{sh} = \frac{R_{app}}{p-1} = \frac{0,4}{5-1} = 0,1 \Omega.$

Constante de l'ampèremètre avec le shunt :  $C_i = \frac{I_{\max}}{\alpha_{app}} = \frac{2,5}{50} = 0,05 \text{ A/div.}$

Courant de circuit :  $I = C_i \cdot \alpha_x = 0,05 \cdot 40 = 2 \text{ A.}$

#### Problème 26.4

Milliampèremètre à deux limites (fig. 26.1) est accompli à la base du microampèremètre magnéto-électrique avec le courant du rejet complet  $I_{app.\max}$  et la résistance  $R_{app}$ . Définir les résistances des résistors  $R_1$  et  $R_2$  du shunt à deux limites, si les limites de mesure par milliampèremètre sont  $I_{1.\max}$  et  $I_{2.\max}$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 26.4.

Tableau 26.4

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{app.\max}$ , $\mu\text{A}$	100	100	100	100	150	150	150	150	300	300	300
$R_{app}$ , $\Omega$	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400
$I_{1.\max}$ , mA	10	50	75	50	75	50	75	10	50	75	75
$I_{2.\max}$ , mA	75	100	150	100	150	100	150	75	150	250	300

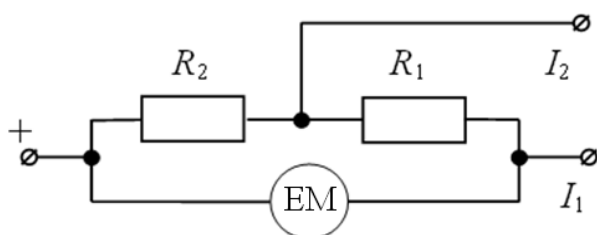


Figure 26.1 – Schema au problème 26.4

**Résolution** de la variante K.

Multiplicateur de shuntage (7.13) :

$$p_1 = \frac{I_{1.\max}}{I_{app.\max}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 100 ;$$

$$p_2 = \frac{I_{2.\max}}{I_{app.\max}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 750.$$

En utilisant (7.14) nous inscrirons un système des équations :

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{R_{app}}{p_1 - 1}; \\ R_2 = \frac{R_1 + R_{app}}{p_2 - 1}, \end{cases}$$

d'où nous trouverons  $R_2 = \frac{R_{app} \cdot p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2} = \frac{2000 \cdot 100}{(100 - 1) \cdot 750} = 2,69 \, \Omega.$

Alors  $R_1 = \frac{R_{app}}{p_1 - 1} - R_2 = \frac{2000}{100 - 1} - 2,69 = 17,51 \, \Omega.$

## Chapitre 27 : TRANSFORMATEURS

### Problème 27.1

Définir le rapport de transformation du transformateur  $n$ , le nombre de spires  $w_1$  du bobinage primaire au nombre des spires du bobinage secondaire  $w_2$ , les courants nominaux  $I_{1nom}$  et  $I_{2nom}$  dans les bobinages du transformateur monophasé de la puissance nominale  $S_{1nom}$ , connecté au réseau de la tension  $U_{1nom} = 127 \, V$ . La tension sur les bornes du bobinage secondaire à la marche à vide est  $U_{20}$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 27.1.

**Tableau 27.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$w_2$ , spires	40	50	60	70	80	80	70	60	60	40	50
$S_{1nom}$ , kBA	3	3,6	4	6	10	5	6,6	6	4,4	3,8	4,2
$U_{1nom}$ , V	127	127	220	220	220	127	220	220	127	127	127
$U_{20}$ , V	60	100	40	60	80	40	40	60	50	40	40

**Résolution de problème** de la variante K.

Rapport de transformation du transformateur

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{127}{60} = 2,11.$$

Puisque  $U_{20} = E_2$ , à la marche à vide du transformateur la chute de potentiel sur le bobinage primaire est insignifiant, c'est pourquoi approximativement  $U_1 \cong E_1$ . Le nombre de spires du bobinage primaire :

$$w_1 = n \cdot w_2 = 2,11 \cdot 40 = 84,4.$$

Etant donné que les puissances apparentes des bobinages sont égaux  $S_1 \cong S_2$ , le courant nominal du bobinage primaire sera :

$$I_{1\text{nom}} = \frac{S_{1\text{nom}}}{U_{1\text{nom}}} = \frac{3 \cdot 1000}{127} = 23,6 \text{ A.}$$

Le courant nominal du bobinage secondaire du transformateur (en tenant compte que  $U_{2\text{nom}} = U_{20}$ ) sera

$$I_{2\text{nom}} = \frac{S_{1\text{nom}}}{U_{20}} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ A.}$$

### Problème 27.2

Définir le rapport de transformation  $n$  du transformateur triphasé et les valeurs nominales efficaces des tensions primaires et secondaires simples (de phases)  $U_{1\text{simpl.nom}}$ ,  $U_{2\text{simpl.nom}}$  et composées (de lignes)  $U_{2\text{comp.nom}}$  pour les cas de le couplage des bobinages «l'étoile-étoile» et «l'étoile-triangle». Le bobinage primaire a le nombre de spires sur la phase  $w_1$ , le bobinage secondaire –  $w_2$ . La tension nominale composée du bobinage primaire  $U_{1\text{comp.nom}}$ . Les données initiales pour le calcul sont amenées au tableau 27.2.

Tableau 27.2

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$w_1$ , spires	2002	1980	1200	1600	1400	2300	2000	1900	1800	1700	1980
$w_2$ , spires	134	126	100	106	94	140	130	127	120	112	126
$U_{1\text{comp.nom}}$ , V	6000	6000	3300	3300	3300	10000	10000	6000	6000	6000	6000

**Résolution de problème** de la variante K.

Le rapport de transformation des tensions de phases

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{2002}{134} = 15.$$

La tension nominale primaire de phase du transformateur

$$U_{1\text{simpl.nom}} = \frac{U_{1\text{comp.nom}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3470 \text{ V.}$$

Les tensions nominales secondaires à la liaison des bobinages du transformateur selon le schéma « l'étoile-étoile » :

tension composée  $U_{2\text{comp.nom}} = U_{1\text{comp.nom}}/n = 6000/15 = 400 \text{ V}$  ;

tension simple  $U_{2\text{simpl.nom}} = U_{2\text{comp.nom}}/\sqrt{3} = 400/1,73 = 230 \text{ V}$  .

Les rapports de transformation du transformateur à la liaison des bobinages selon le schéma « l'étoile-étoile » :

de tensions composées  $n_{Y.\text{comp}} = U_{1\text{comp.nom}}/U_{2\text{comp.nom}} = 6000/400 = 15$  ;

de tensions simples  $n_{Y.\text{simpl}} = U_{1\text{simpl.nom}}/U_{2\text{simpl.nom}} = 3479/230 = 15$  .

Les rapports de transformation du transformateur à la liaison des bobinages selon le schéma « l'étoile-triangle » :

de tensions composées  $n_{\Delta.\text{comp}} = U_{1\text{comp.nom}}/U_{2\text{comp.nom}} = 6000/230 = 26$  ;

de tensions simples  $n_{\Delta.\text{simpl}} = U_{1\text{simpl.nom}}/U_{2\text{simpl.nom}} = 3479/230 = 15$  .

### Problème 27.3

Un transformateur triphasé a la puissance  $S_{\text{HOM}}$ , les tensions nominales des bobinages primaires et secondaires  $U_{1.\text{nom}}$ ,  $U_{2.\text{nom}}$ . La fréquence du réseau  $f = 50 \text{ Hz}$ . Les pertes à vide (pertes fer) à la tension nominale sont  $\Delta P_{\text{m.à.v.}} = 180 \text{ W}$ , les pertes du court-circuit –  $\Delta P_{\text{c-c}} = 1000 \text{ W}$ . Définir le rendement du transformateur à donné  $\cos \varphi_2$  et le coefficient du chargement  $\beta$ , qui change à la gamme de 0,4 jusqu'à 1. Construire la dépendance du rendement du coefficient de la charge. Les données initiales pour le calcul sont amenées au tableau 27.3.

Tableau 27.3

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\text{nom}}$ , kVA	40	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1\text{comp.nom}}$ , kV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2\text{comp.nom}}$ , kV	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\Delta P_{\text{m.à.v.}}$ , kW	0,18	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$\Delta P_{\text{c-c}}$ , kW	1,0	1,4	0,8	1,97	1,97	2,65	2,65	3,7	3,7	5,5	5,5
$\cos \varphi_2$	0,9	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

**Résolution de problème** de la variante K.

Pour définir le rendement du transformateur nous nous servons du rapport (9.16). Le rendement au coefficient de la charge  $\beta = 1,0$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{fer}} + \Delta P_{\text{cuivre}} \cdot \beta^2} = \frac{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_2 + P_{\text{a.v.}} + P_{\text{c-c}} \cdot \beta^2} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9}{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9 + 0,18 + 1 \cdot 1^2} = 0,968.$$

Les résultats de la calcul pour d'autres significations du coefficient du chargement sont amenés dans le tableau 27.4. Sur la figure 27.1 est construite la dépendance du rendement du coefficient de la charge du transformateur.

Tableau 27.4

$\beta$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
$\eta$	0,949	0,970	0,975	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968

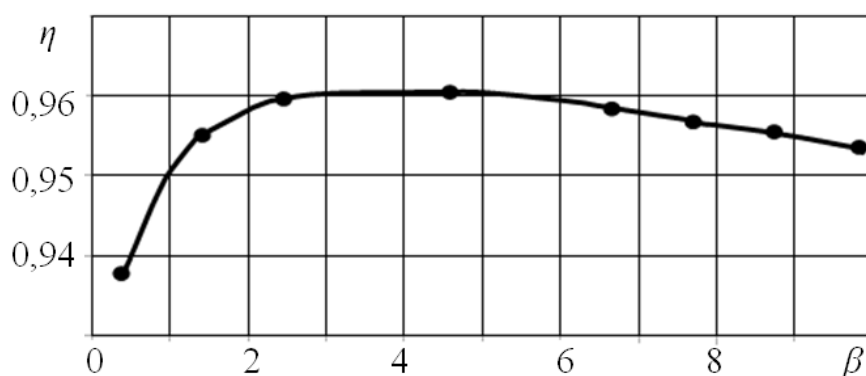


Figure 27.1 – Dépendance calculée du rendement de  $\beta$

### Problème 27.4

Définir les paramètres du schéma de substitution simplifié en- $\Gamma$  du transformateur (fig. 9.4, *b*), avec la puissance nominale  $S_{1nom}$ . Les bobinages du transformateur sont connectés selon le schéma « l'étoile », les tensions nominales linéaires des bobinages primaires et secondaires  $U_{1comp.nom}$ ,  $U_{2comp.nom}$ , le courant de la marche à vide  $I_{m.à.v.} = \% \cdot I_{nom}$ , la puissance de la marche à vide  $P_{m.à.v.}$ , la tension du court-circuit  $U_{c-c} = \% \cdot U_{nom}$ , la puissance du court-circuit  $P_{c-c}$ . Les données initiales pour le calcul sont amenées dans le tableau 27.5.

Tableau 27.5

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{1nom}$ , kBA	50	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1comp.nom}$ , kV	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2comp.nom}$ , kV	0,53	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$I_{m.à.v.}$ , %	7,0	2,8	3,2	2,6	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1	2,1
$P_{m.à.v.}$ , kW	0,35	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$U_{c-c}$ , %	5,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
$P_{c-c}$ , kW	0,33	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

### Résolution de problème de la variante K.

Considérant que  $S_{1nom} \approx S_{2nom}$ , les courants nominaux simples (composés) des bobinages du transformateur :

$$I_{1nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot U_{1nom}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 6000} = 4,82 \text{ A} ;$$

$$I_{2nom} = \frac{S_{1nom}}{\sqrt{3} \cdot U_{2nom}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 530} = 54,5 \text{ A}.$$

Les tensions nominales des phases du transformateur

$$U_{1simpl.nom} = U_{1comp.nom} / \sqrt{3} = 6000 / 1,73 = 3460 \text{ V} ;$$

$$U_{2simpl.nom} = U_{2comp.nom} / \sqrt{3} = 525 / 1,73 = 303 \text{ V}.$$

Le courant de la marche à vide du transformateur

$$I_{m.à.v.} = \frac{7\%}{100} \cdot I_{1nom} = 0,07 \cdot 4,82 = 0,338 \text{ A}.$$

La résistance active de la chaîne magnétisante du schéma du substitution en  $\Gamma$

$$R_0 = \frac{P_{m.à.v.}}{3 \cdot I_{m.à.v.}^2} = \frac{350}{3 \cdot 0,338^2} = 1040 \text{ } \Omega.$$

Les résistances de la chaîne magnétisante :

impédance  $Z_0 = U_{1simpl.nom} / I_{a.v.} = 3460 / 0,338 = 10250 \text{ } \Omega ;$

inductance  $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{10250^2 - 1040^2} = 9800 \text{ } \Omega.$



Les résistances du court-circuit du transformateur :

$$\text{impédance} \quad Z_{c-c} = U_{c-c} \frac{U_{1, \text{nom}}^2}{S_{\text{nom}}} = 0,055 \frac{6000^2}{50000} = 39,6 \, \Omega ;$$

$$\text{active} \quad R_{c-c} = R_1 + R_2' = \frac{P_{\text{m.a.v.}}}{3 \cdot I_{\text{nom}}^2} = \frac{325}{3 \cdot 4,82^2} = 4 \, \Omega ;$$

$$\text{réactive} \quad X_{c-c} = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_{c-c}^2 - R_{c-c}^2} = \sqrt{39,6^2 - 4^2} = 39,5 \, \Omega.$$

## Chapitre 28 : MACHINES À COURANT CONTINU

### Problème 28.1

MCC en mode du moteur a les données nominales suivantes :  $P_{\text{nom}}$  ;  $U_{\text{nom}}$  ;  $I_{\text{nom}}$  ;  $R_{\text{ancr}}$  ;  $I_{\text{excitation}}$  ;  $n_{\text{nom}}$ .

Définir la vitesse nécessaire de la rotation de l'ancre de MCC, qui travaille en régime du générateur avec une tension  $U_g$ . Calculer la puissance nominale du générateur, si la saturation de l'acier et le chauffage acceptent les mêmes, comme en régime du moteur. Les données initiales sont amenées dans le tableau 28.1.

**Tableau 28.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{nom}}$ , kW	11	13	15	18	16	14	12	10	12	14	16
$U_{\text{nom}}$ , V	220	230	240	230	220	230	240	230	220	230	240
$N_{\text{nom}}$ , tr/min	1000	960	900	840	800	1100	1180	960	900	860	800
$I_{\text{nom}}$ , A	62	64	66	68	66	64	62	60	62	64	66
$R_{\text{ancr}}$ , $\Omega$	0,09	0,1	0,14	0,16	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,13	0,15
$I_{\text{excitation}}$ , A	3	3,4	3,6	3,8	4	3,8	3,6	3	3,2	3,4	3,6
$U_g$ , V	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230

**Résolution de problème** de la variante K.

Le courant de l'ancre du moteur et du générateur

$$I_{\text{ancr.motor}} = I_{\text{nom}} - I_{\text{excitation}} = 62 - 3 = 59 \, \text{A} = I_{\text{nom.gen.}}$$

La F.E.M. du moteur et du générateur, sans compte de la chute de potentiel dans le contact de balai :

$$E_{\text{moter}} = U_{\text{nom}} - I_{\text{ancr.moter}} \cdot R_{\text{ancr}} = 220 - 59 \cdot 0,09 = 214,7 \, \text{V};$$

$$E_{\text{gen}} = U_{\text{gen}} + I_{\text{ancr.g}} \cdot R_{\text{ancr}} = 230 + 59 \cdot 0,09 = 235,3 \, \text{V}.$$

La vitesse de la rotation de l'ancre du générateur :

$$\frac{E_{\text{gen}}}{E_{\text{moter}}} = \frac{c \cdot n_{\text{gen}} \cdot \Phi_{\text{gen}}}{c \cdot n_{\text{moter}} \cdot \Phi_{\text{moter}}} = \frac{n_{\text{gen}}}{n_{\text{moter}}},$$

Puisque sous la condition  $\Phi_{\text{gen}} = \Phi_{\text{moter}}$ ,

$$n_{gen} = \frac{E_{gen}}{E_{moteur}} n_{moteur} = \frac{235,3}{214,7} 1000 = 1096 \text{ tr/min.}$$

Si prendre en considération la chute de potentiel sur le contact de balai, par exemple à  $\Delta U_{balai} = 2 \text{ V}$ , alors

$$E'_{moteur} = U_{nom} - I_{ancre.moteur} \cdot R_{ancre} - \Delta U_{balai} = 214,7 - 2 = 212,7 \text{ V},$$

$$E'_g = U_g + I_{ancre.g} \cdot R_{ancre} + \Delta U_{balai} = 235,3 + 2 = 237,3 \text{ V},$$

et la vitesse de la rotation sera

$$n_{gen} = \frac{E'_{gen}}{E'_{moteur}} n_{moteur} = \frac{237,3}{212,7} 1000 = 1116 \text{ tr/min.}$$

Le courant nominal et la puissance nominale :

$$I_{nom.gen} = I_{ancre.gen} - I_{excitation} = 59 - 3 = 56 \text{ A};$$

$$P_{nom.gen} = U_{gen} \cdot I_{nom.gen} = 230 \cdot 56 = 12880 \text{ W} = 12,9 \text{ kW}.$$

### Problème 28.2

Définir la vitesse de la rotation de l'ancre du générateur, dont les paramètres sont :  $P_{nom} = 16,5 \text{ kW}$  ;  $U_{nom} = 230 \text{ V}$  ;  $n_{nom.g} = 1460 \text{ tr/min}$  ;  $R_{ancre} = 0,18 \Omega$  ;  $R_{excitation} = 82 \Omega$  au travail en régime du moteur avec  $U_{moteur} = 220 \text{ V}$ , si la saturation de l'acier et le chaufffge du moteur accepter les même, comme en régime du générateur. Calculer la puissance électromagnétique du moteur.

Les données initiales sont amenées dans le tableau 28.2.

Tableau 28.2

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{nom.gen}, \text{ kW}$	16,5	18	20	22	21	19	17	15	16	18	20
$U_{nom.gen}, \text{ V}$	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230
$N_{nom.gen}, \text{ tr/min}$	1460	1400	1540	1500	1460	1400	1540	1600	1500	1460	1400
$R_{ancre}, \Omega$	0,18	0,2	0,22	0,21	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16	0,18	0,2
$R_{excitation}, \Omega$	82	84	86	85	83	81	80	82	84	85	83
$U_{moteur}, \text{ V}$	220	220	220	230	210	220	210	220	210	220	220

**Résolution de problème** de la variante K.

Le courant de l'ancre du générateur et du moteur :

$$I_{ancre.gen} = I_{nom} + I_{excitation} = P_{nom.gen}/U_{nom.gen} + U_{nom}/R_{excitation} =$$

$$= 16500/230 + 230/82 = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ A};$$

$$I_{ancre.moteur} = I_{ancre.gen} \text{ (selon la donnée du problème).}$$

Le courant consommé par le moteur du réseau, s'aligne

$$I_{moteur} = I_{ancre.moteur} + I_{excitation} = 74,8 + 2,8 = 77,6 \text{ A}.$$

La f.é.m. du générateur et de moteur :

$$E_{gen} = U_{nom.gen} + I_{ancre.gen} \cdot R_{ancre} = 230 + 74,8 \cdot 0,18 = 243,5 \text{ V};$$

$$E_{moteur} = U_{motuer} - I_{ancre/moteur} \cdot R_{ancre} = 220 - 74,8 \cdot 0,18 = 206,5 \text{ V}.$$

La vitesse de rotation de l'ancre du moteur :

$$n_{\text{moteur}} = \frac{E_{\text{moteur}}}{E_{\text{gen}}} n_{\text{nom.gen}} = \frac{206,5}{243,5} 1460 = 1238 \text{ tr/min.}$$

La puissance électromagnétique du moteur

$$P_{\text{élec.magn}} = E_{\text{moteur}} \cdot I_{\text{ancr.moteur}} = 206,5 \cdot 74,8 = 15446 \text{ W} = 15,5 \text{ kW.}$$

La capacité nominale du moteur sera un peu plus petite.

## Chapitre 29 : MACHINES ASYNCHRONES

### Problème 29.1

Le moteur multipolaire à la charge nominale travaille avec le glissement  $g = 4 \%$ . La fréquence du réseau  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ . Définir la vitesse de rotation du moteur. Les données initiales amenée dans le tableau 29.1.

**Tableau 29.1**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de pôles	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4
$g, \%$	4	3,6	3,2	2,8	4,4	4,8	3,3	3,5	3,8	4,2	4,5
$f_1 = 50 \text{ Hz}$	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50

**Résolution de problème** de la variante K.

Nombre de paires de pôles  $p = 6/2 = 3$ .

Vitesse synchrone  $n_1 = f_1 \cdot 60/p = 50 \cdot 60/3 = 1000 \text{ tr/min.}$

Vitesse de rotation du rotor

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - g) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ tr/min.}$$

### Problème 29.2

Vitesse de rotation du moteur à induction à la charge nominale fait  $n_2 \text{ tr/min}$ , à la marche à vide –  $n_{\text{m.à.v.}} \text{ tr/min}$ . Définir le glissement à la charge et à la marche à vide. L'échelle des fréquences de rotation : 3000, 2200, 1600, 1500, 1000, 850, 800, 750, 650, 600 tr/min. Les données initiales amenée dans le tableau 29.2.

**Tableau 29.2**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_{\text{m.à.v.}}, \text{ tr/min}$	2940	2160	1550	820	630	580	580	740	730	780	840
$n_2, \text{ tr/min}$	2850	2040	1320	740	560	510	490	680	660	690	760

**Résolution de problème** de la variante K.

Vitesse synchrone pour ce moteur  $n_1 = 3000$  tr/min (la plus proche).

Glissement en charge

$$g = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 = \frac{3000 - 2850}{3000} 100 = 5\%,$$

à la marche à vide

$$g = \frac{3000 - 2940}{3000} 100 = 2\%.$$

### Problème 29.3

Un moteur à bagues est inséré dans un réseau de tension  $U_{\text{nom}}, \text{V}$ . La tension mesurée des anneaux ouverts du rotor a fait  $U_2, \text{V}$ . Le nombre de spires des bobinages de phases du stator –  $w_1 = 60$ , coefficients de correction –  $k_1 = 0,94$  ; bobinages du rotor –  $w_2 = 36$ ,  $k_2 = 0,96$ . Les bobinages sont connectés par « l'étoile ». La fréquence du réseau  $f_1, \text{Hz}$ .

Définir le flux qui passe par le pôle du moteur et la f.é.m. du stator  $E_1$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 29.3.

**Tableau 29.3**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{nom}}, \text{V}$	380	380	220	220	400	400	400	390	390	380	380
$U_2, \text{V}$	228	224	129	127	300	292	268	240	236	210	216
$w_1, \text{spires}$	60	60	54	54	66	68	70	64	62	62	60
$k_1$	0,94	0,92	0,94	0,92	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
$w_2, \text{spires}$	36	35	32	30	40	38	42	40	38	38	36
$k_2$	0,96	0,94	0,96	0,92	0,93	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,94
$f_1, \text{Hz}$	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50

**Résolution de problème** de la variante K.

f.é.m. de phase du rotor immobile

$$E_{2.\text{imm}} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{228}{1,73} = 132 \text{ V}.$$

Flux

$$\Phi = \frac{E_{2.\text{imm}}}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2} = \frac{132}{4,44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0,96} = 0,0173 \text{ Wb}.$$

f.é.m. du stator

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 0,94 \cdot 0,0173 = 216 \text{ V}.$$

### Problème 29.4

Définir la valeur et la phase du courant nominal du rotor du moteur à bagues, aux données  $E_{2,imm}$ ,  $R_2$ ,  $X_{2,imm}$  et  $g_{nom}$ .

Les données initiales sont amenées dans le tableau 29.4.

Tableau 29.4

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_{2,imm}$ , V	132	130	126	122	136	140	138	135	133	137	131
$R_2$ , $\Omega$	0,24	0,22	0,2	0,2	0,25	0,27	0,26	0,25	0,23	0,27	0,22
$X_{2,imm}$ , $\Omega$	1,2	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4	1,35	1,3	1,1	1,4	1,1
$g_{nom}$	0,035	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04	0,035

### Résolution de problème de la variante K.

$$I_{2,imm} = \frac{E_{2,imm} \cdot g}{\sqrt{R_2^2 + X_{2,imm}^2 \cdot s_{nom}^2}} = \frac{132 \cdot 0,035}{\sqrt{0,24^2 + 1,2^2 \cdot 0,035^2}} = 19 \text{ , A ;}$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2,imm} \cdot s_{nom}}{R_2} = \frac{1,2 \cdot 0,035}{0,24} = 0,175; \quad \psi_2 = 9^{\circ}55'.$$

Si à la définition du courant nominal du rotor négliger par la résistance inductive  $X_2 = X_{2,imm} \cdot g$ , nous recevrons

$$I_{2,imm} = \frac{E_{2,imm} \cdot g}{R_2} = \frac{132 \cdot 0,035}{0,24} = 19,2 \text{ A.}$$

### Problème 29.5

Paramètres nominaux du moteur : puissance –  $P_{nom}$ , kW ; tension –  $U_{nom}$ , V ; rendement –  $\eta_{nom}$  ; facteur de puissance  $\cos \varphi_{nom}$  ; pertes dans l'acier –  $\Delta P_{acier}$  ; pertes électriques dans les bobinages du stator  $P_{el.stator}$ .

Définir le courant consommé et la puissance électromagnétique du moteur en régime nominal. Les données initiales sont amenées au tableau 29.5.

Tableau 29.5

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{nom}$ , kW	10	11	7,5	7,5	5,5	5,5	4	4	3	2,2	2,2
$U_{nom}$ , V	380	380	380	380	380	380	380	220	220	220	220
$H_{nom}$	0,88	0,9	0,78	0,84	0,86	0,88	0,86	0,85	0,84	0,84	0,82
$\cos \varphi_{nom}$	0,87	0,84	0,87	0,86	0,85	0,84	0,8	0,84	0,82	0,8	0,76
$\Delta P_{acier}$	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05
$\Delta P_{el.stator}$	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03

**Résolution de problème** de la variante K.

Puissance consommée

$$P_1 = \frac{P_{\text{nom}}}{\eta_{\text{nom}}} = \sqrt{3} U_{\text{nom}} \cdot I_{\text{H}} \cdot \cos \varphi_{\text{H}}.$$

Courant nominal

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{nom}}}{\sqrt{3} U_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_{\text{nom}} \cdot \eta_{\text{nom}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 20, \text{ A}.$$

Puissance électromagnétique en régime nominal

$$P_{\text{él.magn}} = P_1 - \Delta P_{\text{acier}} - \Delta P_{\text{el.stator}} = P_{\text{nom}}/\eta_{\text{nom}} - 0,05 \cdot P_{\text{nom}} - 0,03 \cdot P_{\text{nom}} = \\ = 10/0,88 - 0,05 \cdot 10 - 0,03 \cdot 10 = 10,55, \text{ kW}.$$

**Problème 29.6**

Un moteur asynchrone à cage a les données suivantes : puissance nominale  $P_{\text{nom}}$  ; tension nominal  $U_{\text{nom}}$  ; rendement  $\eta$  ;  $\cos \varphi = 0,89$  ; multiplicité du courant de démarrage  $k_{\text{dém}} = I_{\text{dém}}/I_{\text{nom}} = 7$  ; multiplicité du couple de démarrage  $k_{\text{couple}} = M_{\text{dém}}/M_{\text{nom}} = 1,3$  ; vitesse de la rotation du rotor  $n_2$ . Définir le couple et le courant de démarrage du moteur.

Les données initiales sont amenées dans le tableau 29.6.

**Tableau 29.6**

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{nom}}, \text{ kW}$	20	22	18,5	15	11	7,5	30	37	45	55	75
$U_{\text{nom}}, \text{ V}$	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
$H_{\text{nom}}, \%$	87,5	89	86,4	84	84	83	88	88	89	90	91
$\cos \varphi$	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,89	0,86	0,9	0,9	0,9
$k_{\text{dém}}$	7	6,6	6,5	6,5	6,4	6,4	7	7	7	7	7
$k_{\text{couple}}$	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3	1,5	1,5	1,4	1,6	1,6	1,6
$n_2, \text{ tr/min}$	2930	2910	2940	2950	1440	1450	960	970	980	980	980

**Résolution de problème** de la variante K.

Couple nominal

$$M_{\text{nom}} = 975 \cdot P_{\text{nom}}/n_2 = 975 \cdot 20/2930 = 6,65 \text{ kgF} \cdot \text{m}.$$

Couple de démarrage

$$M_{\text{dém}} = M_{\text{nom}} \cdot k_{\text{couple}} = 6,65 \cdot 1,3 = 8,64 \text{ kgF} \cdot \text{m}.$$

Courant nominal

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{nom}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{20 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,875} = 39,6 \text{ A}.$$

Courant de démarrage

$$I_{\text{dém}} = I_{\text{nom}} \cdot k_{\text{dém}} = 39,6 \cdot 7 = 277 \text{ A}.$$

### Problème 29.7

Comment changeront le couple de démarrage et le courant du moteur examiné dans le problème 29.6, si pendant la mise en marche la tension est réduite sur 20 %.

**Résolution de problème** de la variante K.

Couple de démarrage est proportionnelle de  $U^2$ , c'est pourquoi

$$M_{\text{dém.1}} = 0,8^2 \cdot M_{\text{dém}} = 0,64 \cdot 8,64 = 5,5 \text{ kgF}\cdot\text{m},$$

La réduction sera 34%.

On peut trouver le courant de mise en marche proportionnel à la tension  $U$ . Ainsi, il baissera sur 20 % et sera égal

$$I_{\text{dém.1}} = I_{\text{dém}} \cdot 0,8 = 277 \cdot 0,8 = 221,6 \text{ A}.$$

## Chapitre 30 : ENTRAÎNEMENT ÉLECTRIQUE

### Problème 30.1

L'électromoteur est chargé du couple résistant  $M_{\text{st}}$  qui ne dépende pas de la vitesse. Le moment d'inertie résultant  $J$ . Fixer l'heure de la dispersion du moteur jusqu'à la vitesse nominale  $n_{\text{nom}}$  de l'état du repos, si le couple moyen du moteur pendant la dispersion  $M$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 30.1.

Tableau 30.1

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M_{\text{st}}$ , kgF·m	7	8	9	10	9	8	7	6	5	7	8
$J$ , kgF·m s <sup>2</sup>	0,3	0,4	0,5	0,25	0,34	0,44	0,52	0,48	0,4	0,3	0,4
$N_{\text{nom}}$ , tr/min	960	1200	1400	1600	1400	1300	1200	1100	1000	980	920
$M$ , kgF·m	15	16	17	18	17	16	14	13	15	17	16

**Résolution de problème** de la variante K.

Pour déterminer le temps d'accélération nous nous servirons de l'équation du mouvement entraînement électrique (14.13), d'où il suit que

$$dt = \frac{J}{M - M_{\text{st}}} d\omega.$$

Nous exprimerons le temps de la dispersion

$$t = \int_{\omega=0}^{\omega_{\text{nom}}} \frac{J}{M - M_{\text{st}}} d\omega = \frac{J}{M - M_{\text{st}}} \omega_{\text{nom}} = \frac{J}{M_{\text{dyn}}} \omega_{\text{nom}}. \quad (30.1)$$

Les moyennes du moment dynamique sur l'arbre du moteur pendant la dispersion nous définirons selon la formule

$$M_{\text{dyn}} = M - M_{\text{st}} = 15 - 7 = 8 \text{ kgF}\cdot\text{m}.$$

La valeur nominale de la vitesse angulaire nous définirons comme suit

$$\omega_{\text{nom}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{nom}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 960}{60} = 100,5 \text{ rad/s.}$$

Ayant mis la signification  $\omega_{\text{nom}}$  à (30.1), nous recevrons le temps de la dispersion

$$t = \frac{0,3}{8} \cdot 100,5 = 3,8 \text{ s.}$$

### Problème 30.2

Définir réduits à l'arbre du moteur le moment de la résistance statique et le moment d'inertie du mécanisme de la grue élévatrice avec la charge (fig. 30.1). Définies : le poids de la charge  $G$ , la vitesse de levage de la charge  $V$ , la vitesse de rotation du moteur  $n$ , le moment d'inertie du moteur  $J_{\text{moteur}}$ , le moment d'inertie du manchon et de mécanisme de la grue  $J_{\text{méc}}$ , le rendement de la grue  $\eta_{\text{grue}}$ . Les données initiales sont amenées dans le tableau 30.2.

Tableau 30.2

Paramètre	Variante du devoir										
	K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G$ , kgF	1000	1100	1200	960	980	920	900	960	1000	1200	1000
$V$ , m/min	25	26	27	24	23	22	21	23	26	25	27
$n$ , tr/min	730	760	800	840	800	760	730	700	750	770	800
$J$ moment	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06
$J_{\text{méc}}$ , kgF·m·s <sup>2</sup>	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
$\eta_{\text{treuil}}$	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6

**Résolution de problème** de la variante K.

Le moment d'inertie réduit des éléments, en cas de mouvement progressif, est défini de l'égalité

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2},$$

d'où 
$$J = m \left( \frac{v}{\omega} \right)^2.$$

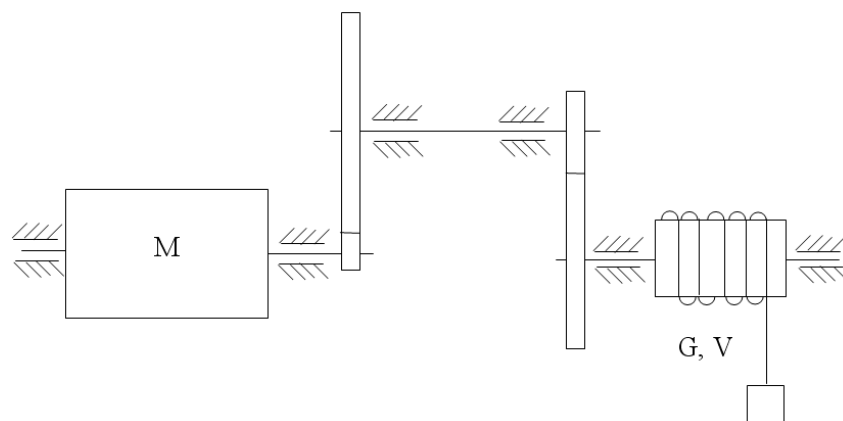
La vitesse angulaire du moteur et la masse de la charge

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 730}{60} = 76,4 \text{ rad/s; } m = \frac{G}{g} = \frac{1000}{9,81} = 101,94 \text{ kg.}$$

Alors le moment d'inertie de la charge, dont le déplacement est progressif

$$J_{ch} = 101,94 \cdot \left( \frac{25}{60 \cdot 76,4} \right)^2 = 0,0032 \text{ kgF} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2.$$





**Figure 30.1** – Schéma du mécanisme de levage

Le moment d'inertie totale de la charge

$$J_{\Sigma} = J_{\text{dyn}} + J_{\text{méc}} + J_{\text{ch}} = 0,08 + 0,02 + 0,0032 = 0,1032 \text{ kgF} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2.$$

Le moment statique de la résistance réduit sur l'arbre du moteur selon (13.9) est égal

$$M_{\text{st}} = G \cdot \rho / \eta.$$

Nous définirons  $\rho$  selon la formule

$$\rho = \frac{v}{\omega} = \frac{25}{76,4 \cdot 60} = 0,0055 \text{ m},$$

alors

$$M_{\text{st}} = \frac{1000 \cdot 0,0055}{0,8} = 6,9 \text{ kgF} \cdot \text{m}.$$

### Problème 30.3

Un mécanisme travaille en régime permanent selon le graphique de la charge. Choisir pour ce entraînement électrique un moteur asynchrone en court-circuit de la série AO. La vitesse de rotation  $n$ , la durée des degrés de la charge  $t$ , et les valeurs correspondantes du moment de la charge  $M$ , sont amenées dans le tableau 30.3.

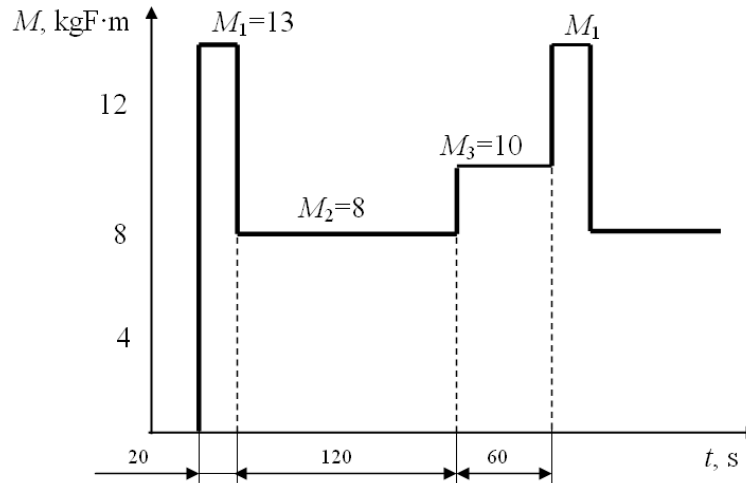
**Tableau 30.3**

Paramètre		Variante du devoir										
		K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n, \text{tr/min}$		970	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1	$t, \text{s}$	20	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	$M, \text{kgF} \cdot \text{m}$	13	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2	$t, \text{s}$	120	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	$M, \text{kgF} \cdot \text{m}$	8	20	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3	$t, \text{s}$	60	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	$M, \text{kgF} \cdot \text{m}$	10	12	9	75	34	20	65	80	50	60	30

**Résolution de problème** de la variante K.

Sur la figure 30.2 est montré le graphique du moment de la charge. Nous définirons le moment équivalent de la charge

$$M_{\text{équiv}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{13^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 120 + 10^2 \cdot 60}{20 + 120 + 60}} = 9,4 \text{ , kgF} \cdot \text{m}.$$



**Figure 30.2** – Graphique du moment de la charge

La puissance équivalente du moteur est définie selon la formule

$$P_{\text{équiv}} = M_{\text{équiv}} \cdot \omega = M_{\text{équiv}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = 9,4 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 970}{30} = 9300 \text{ W} = 9,3 \text{ kW}.$$

Nous négligeons par les changements de la vitesse du moteur aux changements de la charge.

Selon le catalogue nous choisissons le moteur AO63-6 :  $P_{\text{nom}} = 10 \text{ kW}$  ;  $n = 980 \text{ tr/min}$  ;  $\eta = 87\%$  ;  $M_{\text{cr}}/M_{\text{nom}} = 2,2$  ;  $M_{\text{dém}}/M_{\text{nom}} = 1,4$ .

Nous contrôlons l'électromoteur selon capacité de surcharge et du couple de démarrage :

$$M_{\text{nom}} = 975 \frac{P_{\text{nom}}}{n} = 975 \frac{10}{980} \approx 10 \text{ kgF} \cdot \text{m} ;$$

$$M_{\text{cr}} = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ kgF} \cdot \text{m} ;$$

$$M_{\text{dém}} = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ kgF} \cdot \text{m} .$$

Le moteur choisi répond aux exigences de la surcharge et du couple de démarrage.

### Problème 30.4

En se servant du catalogue, choisir le moteur asynchrone à cage pour un mécanisme de levage travaillant en mode cadencé selon le graphique de la charge. La vitesse de rotation  $n$ , la durée des degrés de la charge  $t$  et les valeurs correspondantes de la puissance de la charge  $P$  sont amenées dans le tableau 30.4.

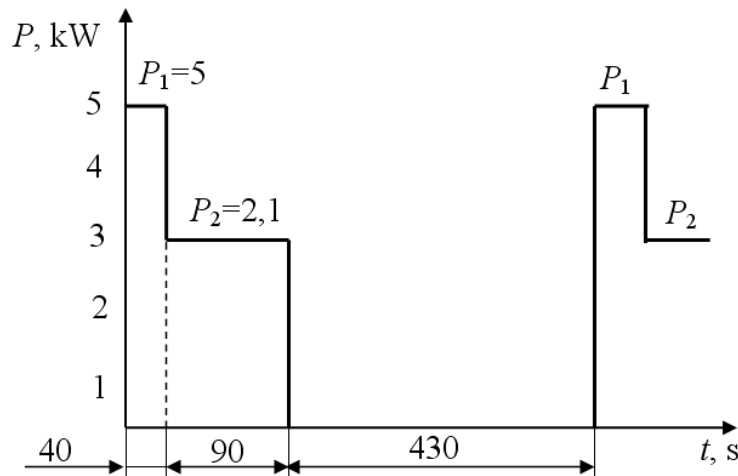
**Tableau 30.4**

Paramètre		Variante du devoir										
		K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n, \text{tr/min}$		900	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1	$t, \text{s}$	40	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	$P, \text{kW}$	5	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2	$t, \text{s}$	90	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	$P, \text{kW}$	2,1	4	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3	$t, \text{s}$	430	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	$P, \text{kW}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Résolution de problème** de la variante K.

La figure 30.3 montre le graphique de la charge. Définissons la puissance équivalente pour la période ouvrière

$$P_{\text{équiv}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{5^2 \cdot 40 + 2,7^2 \cdot 90}{40 + 90}} = 3,6 \text{ kW.}$$



**Figure 30.3** – Graphique de la charge

La durée réelle de l'insertion

$$FM_1 = \frac{t_{tr}}{t_{tr} + t_p} \cdot 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \cdot 100 = \frac{40 + 90}{40 + 90 + 430} \cdot 100 = 23 \text{ \%}.$$

Recalculerons la puissance équivalente sur la signification standard  $FM_2 = 25 \text{ \%}$

$$P_{\text{équiv}}' = P_{\text{équiv}} \sqrt{\frac{FM_1}{FM_2}} = 3,6 \sqrt{\frac{23}{25}} = 3,46 \text{ kW.}$$

Par la valeur  $P_{\text{équiv}}' = 3,46 \text{ kW}$  selon le catalogue on choisit un moteur asynchrone à cage de série de grue du type MTK12-6, dont les paramètres pour  $FM = 25\%$  sont :  $P_{\text{nom}} = 3,5 \text{ kW}$  ;  $n = 883 \text{ tr/min}$  ;  $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{nom}}} = 2,6$  ;  $\frac{M_{\text{dém}}}{M_{\text{nom}}} = 2,6$ .

Le moteur choisi satisfait aussi les exigences de mise en marche et de la surcharge.

## LISTE D'ABRÉVIATIONS ET D'INDICES

### Liste d'abréviations

AM – appareils de mesure  
AMÉ – appareils de mesure électrique  
AMME – appareil de mesure magnéto-électrique  
ATC – amplificateur de tension  
AZ – appareil de zéro

BC – base commune  
BE – bobinage d'excitation

CAF – caractéristique amplitude-fréquence  
CC – collecteur commun  
CEI – Commission Électrotechnique Internationale  
C – convertisseur  
CP – convertisseur primaire  
CR – convertisseurs de redressement

DC – dispositif de commande  
DE – dispositif d'entrée

ÉC – émetteur commun  
EM – élément de mesure  
etc. – et cetera

i.e. – c'est à dire  
IS – installations de sortie  
ISO – Organisation Internationale de Normalisation  
IT – installation de transmission

f.é.m. – force électromotrice  
FM – facteur de marche (durée d'enclenchement relative)

GS – générateur(trice) synchrone

MAS – machine asynchrone  
MCC – machine à courant continu  
ME – machine (moteur) électrique  
MLT – matériel de levage et de transport  
MS – machine synchrone

OT – organe de travail

SE – source d'alimentation  
SUDC - Système Unifié de la Documentation de Conception  
SCC – Système de climatisation centralisées

### Liste d'indices

add – additionnelle  
adm – admissible  
alim. – alimentation  
amorç. – amorçage  
ancr – ancre  
app – appareil  
aux – auxiliaire

balais – balais  
b.ten – bobine de tension  
c – complèt

calc – calcule  
ch – charge  
c-c – court-circuit  
c.s. – consommation spécifique  
coord – coordonné  
command – commande  
com – commune  
comm – commutation  
comp – compensation  
composé – composé (de ligne)  
cons – consommateur

couple — couple  
 cr — critique  
 cuivre — cuivre  
  
 dém — démarrage  
 dériv — dérivée  
 disp — dispersion  
 dir. — directe  
 dyn — dynamique  
  
 eff — efficace  
 élect(s) — électrique(s)  
 él.m. — électromagnétique  
 él.norm — élément normal  
 entr — entrée  
 équiv — équivalent(e)  
 établi — établi  
 exact — exactitude  
 exc — excitation  
  
 fer — fer  
 fin — finesse  
 fuit — fuite  
  
 g — glissement  
 gén — générateur  
  
 imm — immobile  
 induit — induit  
 int — interne  
 inv. — inverse  
  
 ligne — ligne  
 lim — limité  
  
 m — amplitude de quelque valeur  
 machine — machine  
 m.à.v. — marche à vide  
 max — maximal(e)  
 mécs — mécaniques  
 m.i. — mécanisme industriel  
 mes — mesurée  
 min — minimale  
 m.m. — mise en marche  
 moteur — moteur

moy — moyenne  
  
 naturelle — naturelle  
 noeud — noeud  
 nom — nominale  
  
 ot — organe de travail  
  
 p — pause  
 percem. — percement  
 pertes — pertes  
 pertes.s — pertes à l'intérieur de la source  
 pas — passage  
 ph — phase  
 pôles.suppl. — pôles supplémentaires  
  
 rég — réglage  
 réd — réducteur  
 rés — résistant  
 réseau — réseau  
 résiduel(le) — résiduel(le)  
 résul — résultante  
 rotor — rotor  
  
 sch — schema  
 sécurité — sécurité  
 série — série  
 sh — shunt  
 simple — simple (de phase)  
 sort — sortie  
 sours — source  
 st — statique  
 stator — stator  
 suc — successiv  
 suppl(s) — supplémentaire(s)  
 surch — surcharge  
  
 tot — totale  
 tour — tournant  
 transf — transformateur  
 tr — travail  
  
 val — valable  
 vér — véritable

## TABLE ANALYTIQUE

### A

Admittance 97  
 Ampère 11  
 Ampèremètre 19, 123, 146  
 Amplificateur 132, 280  
 Amplitude 11, 68  
     complexe 69  
 Ancre 173  
 Angle :  
     de déphasage 66  
     de commande 270  
 Anode 250  
 Appareil de mesure électrique 119:  
     analogique 120, 132  
     électrodynamique 126  
     électromagnétique 124  
     ferrodynamique 127  
     magneto-électrique 122  
     numérique 120, 133  
 Ascenseur 379  
 Auto-transformateurs 19, 131, 169

### B

Balais 175, 202, 320  
 Bande passante de l'amplificateur 281  
 Base du transistor 254  
 Bobinage (bobine) :  
     de compensation 178  
     d'excitation 173, 182  
     primaire (secondaire) du transformateur 160  
 Branche 17

### C

Capacité 13  
 Caractéristique 12 :  
     amplitude-fréquence 279  
     angulaire de la MS 235  
     de couple 217  
     électromécanique 191  
     extérieur 185, 187  
     extérieur du transformateur 166  
     mécanique 183, 191  
     naturelle 192  
     rhéostatique 193  
     à vide 184, 185, 232  
     de vitesse 183, 217  
     de volt-ampère 249

Cathode 250  
 Charge 24  
 Chauffage électrique 383  
 Circuit électrique 9 :  
     linéaire, 12  
     non linéaire, 12  
     non ramifié 12  
     ramifié 12, 17  
 Classe de précision de l'appareil 125, 128, 129  
 Coefficient :  
     de capacité de surcharge 215  
     d'efficacité 28  
     de la finesse de régulation 302  
     de redressement 131  
     de sécurité 297  
     de transformation 130,  
 Collecteur d'un ME 174  
 Collecteur d'un transistor 254  
 Commutation des bobinages de MAS :  
     de l'étoile simple sur l'étoile double 313  
     du triangle sur l'étoile double 314  
 Complexe :  
     de la puissance apparente 90, 92  
     de la résistance imaginaire 86  
     d'admittance 97  
 Condensateur 14, 19  
 Conditionneur 379  
 Conductibilité 33 :  
     active (conductance) 97  
     mutuel de nœud 49  
     propre de nœud 49  
     reactive (susceptance) 97  
 Contrôleur 331  
 Convertisseur de mesure 127  
 Couple :  
     critique 214  
     dynamique 289  
     électromagnétique du générateur  
     synchrone 233  
     de la machine asynchrone 213  
     nominale 215  
     réduit 288  
     résistant actif 289  
     résistant réactif 289  
     résistant statique 288  
 Courant électrique 10 :  
     alternatif 11

- composante active 72
- composante reactive 72
- composé 108
- continu 10
- de court-circuit 23
- de maille 51
- de marche à vide 23, 162
- nominale 25
- périodique 11
- simple 108
- sinusoïdal 11

## D

- Diagramme
  - de charge 297
  - vectériel 67
- Diode
  - au germanium 251
  - de semi-conducteur 249
  - au sélénium 251
  - au silicium 249
- Dipôle 16
  - actif 16, 55, 58
  - passif 16, 58
- Dispositif de mesure électriques 120
- Durée d'enclenchement relative 299

## E

- Éclairage 368
- Éclairement lumineux 367
- Électrique :
  - brûlure 387
  - choc 387
  - signe 388
- Électroconvecteur 384
- Élément :
  - actif 13
  - capacitif 64
  - idéale (parfait) 13
  - inductif 62
  - linéaire, non-linéaire 12
  - passifs 13
  - résistif 61
- Émetteur du transistor 255
- Entraînement électrique 283
- Erreur de mesure 136
  - absolue 136
  - méthodique 136
  - relative 137
  - réduite 137
  - systématique 136

- systématiques 136

- Essai :
  - en court-circuit 165
  - à vide 165
- Étalon 119

## F

- Facteur :
  - de marche 299
  - d'ondulation 263
  - de puissance ( $\cos\varphi$ ) 90, 100
- Filtre :
  - capacitif 277
  - inductif 277
  - de nivellement 258, 276
- Finesse de réglage 302
- Forces électromotrices (f.é.m.) 11, 13 :
  - de self-induction 62
  - du stator et du rotor 204
- Fréquence 11 :
  - angulaire 66

## G

- Générateurs 19, 105, 157
  - à courant continu 176, 320
  - à excitation composée 188
  - à excitation dérivée 185
  - à excitation indépendante 184
  - à excitation série 187
  - de soudage 320
  - synchrone 230
- Glissement 202 :
  - critique 214

## I

- Impédance 94
- Inductance 13 :
  - mutuelle 14
- Intensité lumineuse 367
- Interrupteur :
  - automatique 19, 340
  - de fin de course 339
- Intervalle de la graduation 121

## L

- Loi :
  - de l'induction électromagnétique 62
  - de Joule-Lenz 30
- Loi d'Ohm, 21 :
  - généralisée pour la section active
  - de la chaîne 25

dans la forme complexe 78 , 84  
Lois de Kirchhoff 40

## M

Machine électrique :  
asynchrone 200  
à courant continu 173  
électroportative à main 350  
à excitation composée 188, 196  
à excitation dérivée 185  
à excitation indépendante 184, 189  
à excitation série 187, 193  
de grue 328  
synchrone 228  
Matériel de levage et de transport 327  
Mesure :  
de courant 144  
de l'énergie électrique 152  
de la puissance 148  
de la puissance active 150  
de la puissance réactive 151  
de la tension 144  
des valeurs non électriques 153  
Méthode 139 :  
des courants de maille 50  
différentielle 140  
du générateur équivalent 55  
de mesure directe 140  
nodale 48  
des pertes moyennes 297  
de la puissance spécifique 373  
de substitution 140  
de superposition 52  
des transformations équivalentes 35  
des valeurs équivalentes 298  
du zero 140  
Mise :  
au neutre (391  
à la terre 391  
Mode (régime) :  
cadencé 299  
coordonné 25, 31  
de court-circuit 23, 162  
de courte durée 299  
établi 190  
de freinage 203  
freinage dynamique 222  
en génératrice 203  
moteur 203, 317  
nominal 24  
transitoire 290

à vide 23, 162

Moment :  
d'inertie 289  
résultant (ou totale) 288

Moteur :  
asynchrone 222  
asynchrone monophasé 223  
à courant continu 173, 189  
synchrone 238

## N

Noeud 17  
Neutre 107

## O

Ohm 12, 19  
Ordre des phases :  
direct 106  
inverse 106

## P

Période 11  
Phase 64 :  
initiale 64  
Plage de régulation 302  
Poste de soudage 322  
avec une self incorporée 323  
avec une self séparée 322  
avec un shunt magnétique mobile 324  
Principe :  
de réciprocité 53  
de superposition 52  
Puissance 27  
active 90  
apparente 88  
de la bobine d'induction 87  
électromagnétique 212  
instantanée 62, 76  
nominale 100, 212  
des pertes 29  
réactive 90  
réactive capacitive 84  
réactive inductive 82  
utile 29

## R

Rapport :  
de transformation 161,  
de transformation de la f.é.m. du moteur  
asynchrone 206  
périod-durée d'impulsions de commande 307



Réaction d'induit 177  
 Redresseur 258  
   commandé 270  
   double alternance monophasé 261  
   en pont monophasé 263  
   simple alternance monophasé 259  
   à semi-conducteurs 258  
   triphasé avec un point neutre 266  
   triphasé en pont 267

Rechauffage électrique  
   du béton 359  
   du sol 363

Relais 19, 333

Rendement 28

Résistance 13, 19  
   active 62, 76  
   additionnelle 123  
   capacitive 82  
   complexe 80  
   équivalente 32, 34, 39  
   d'entrée 36, 62  
   inductive 80  
   réactive 93

Résonance :  
   à la chaleur 295  
   en courant 99  
   en tension 95

Rotor 200 :  
   à cage d'écureuil 201  
   bobiné 201

## S

Schéma :  
   de compensation 143  
   de mesure 140  
   du pont de mesure 141  
   de substitution (équivalent) 15, 162, 211

Sécurité électrique 386

Sensibilité de l'appareil de mesure 121  
   absolue 121  
   relative 121

Seuil de sensibilité 121

Shunt 123, 128

Soudage 317 :  
   à l'arc 317  
   par contacts 325  
   sous flux 318

Source :  
   de courant 15

de f.é.m 14

de lumière 368

Stabilité statique 294

Stator 200

Susceptance :  
   inductive (capacitive) 97

Système :  
   de l'approvisionnement en eau 381  
   informatique de mesurage 120  
   triphasé 105 :  
     asymétriques 109  
     symétrique 106

de ventilation d'air 378

Système Unifié de la Documentation de  
 Conception (SUDC) –16, 18

## T

Tension 11  
   composée 107  
   de court-circuit 23, 166  
   nominale 25  
   simple 107  
   à vide 23

Thyristor 252

Transformateur 160 :  
   autotransformateur 131, 169  
   de mesure 171  
   de mesure de la tension 129  
   de mesure du courant 129  
   monophasé 161  
   triphasé 168

Transistor 254

Travail du courant électrique 27

Triangle :  
   des résistances 87  
   des tensions 86

## V

Valeur efficace 64, 69

Vibrateur 352

Vitesse de rotation 177, 190, 221

Volt 11

Voltmètre 19, 123

## W

Watt 27

Wattmètre 19, 126

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### 1. Références principales

1. **Березина Т. Ф.** Задачник по общей электротехнике с основами электроники / Т. Ф. Березина, Н. Г. Гусев, В. В. Масленников. – Москва : Высш. школа, 1991. – 380 с.
2. **Борисов Ю. М.** Электротехника : учебник для вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
3. **Данилов И. А.** Общая электротехника с основами электроники : учеб. пособие для вузов / И. А. Данилов, П. М. Иванов. – Москва : Высш. школа, 2000. – 751 с.
4. **Жаворонков М. А.** Электротехника и электроника : учеб. пособие для вузов / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – Москва : Изд. центр «Академия», 2005. – 400 с.
5. **Зайцев В. Е.** Электротехника. Электроснабжение, электротехнология и электрооборудование строительных площадок : учеб. пособие / В. Е. Зайцев, Т. А. Нестерова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 128 с.
6. **Иванов И. И.** Электротехника. Основные положения, примеры и задачи / И. И. Иванов, А. Ф. Лукин, Г. И. Соловьев. – Санкт-Петербург : Изд-во «Лань», 2002. – 192 с.
7. **Касаткин, А. С.** Электротехника : учебник для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Изд. центр «Академия», 2008. – 544 с.
8. **Китаев В. Е.** Электротехника с основами промышленной электроники : учебник для вузов / В. Е. Китаев. – Москва : Высш. школа 1985. – 224 с.
9. **Колонтаєвський Ю. П.** Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. А. Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2004. – 432 с.
10. **Константинов В. И.** Сборник задач по теоретической электротехнике / В. И. Константинов, Н. Н. Мансуров, А. Ф. Симонов, А. А. Федоров-Королев. – Москва : Энергия, 1968. – 240 с.
11. **Ломоносов В. Ю.** Электротехника / В. Ю. Ломоносов, К. М. Поливанов, О. П. Михайлов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 400 с.
12. **Лябук М. Н.** Електротехніка : навч. посібник / М. Н. Лябук. – Луцьк : ЛДТУ, 2005. – 683 с.
13. **Матвіїв Д. І.** Основи електротехніки і електроніки : навч. посібник / Д. І. Матвіїв. – Дніпропетровськ : НГУ, 2005. – 133 с.
14. **Мілих В. І.** Електротехніка та електромеханіка : навч. посібник / В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2005. – 375 с.
15. **Морозов А. Г.** Электротехника, электроника и импульсная техника : учеб. пособие / Морозов А. Г. – Москва : Высш. школа, 1987. – 448 с.
16. **Общая электротехника с основами электроники : учебник** / В. А. Гаврилюк, Б. С. Гершунский, А. В. Ковальчук и др. – Киев : Выща школа, 1980. – 480 с.

17. **Основы промышленной электроники** : учеб. пособие / В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, Д. Е. Краснопольский ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высш. школа, 1986. – 336 с.
18. **Паначевний Б. І.** Загальна електротехніка : теорія і практикум : підручник / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун. – Київ : Каравела, 2004. – 440 с.
19. **Рекус Г. Г.** Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие / Г. Г. Рекус, А. И. Белоусов. – Москва : Высш. школа, 2001. – 416 с.
20. **Рекус Г. Г.** Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие / Г. Г. Рекус, В. Н. Чесноков. – Москва : Высш. школа, 2001. – 255 с.
21. **Сборник задач по общей электротехнике** / под ред. В. С. Пантюшина. – Москва : Высш. школа, 1973. – 280 с.
22. **Справочное пособие по электротехнике и основам электроники** : учеб. пособие / П. В. Ермуратский, А. А. Косякин, В. С. Листвин и др. ; под ред. А. В. Нетушила. – Москва : Высш. школа, 1986. – 248 с.
23. **Тамм И. Е.** Основы теории электричества : учеб. пособие / И. Е. Тамм. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 615 с.
24. **Титаренко М. В.** Електротехніка : навч. посібник / М. В. Титаренко. – Київ : Кондор, 2004. – 240 с.
25. **Трегуб А. П.** Электротехника : учеб. пособие / А. П. Трегуб ; под ред. Э. В. Кузнецова. – Киев : Высш. школа, 1987. – 599 с.
26. **Электротехника** : учеб. пособие / М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, В. П. Данильченко и др. ; под ред. В. С. Пантюшина. – Москва : Высш. школа, 1976. – 560 с.
27. **Электротехника** : учебник / Х. Э. Зейдель, В. В. Коген-Далин, В. В. Крымов и др. ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высш. школа, 1985. – 480 с.

## 2. Références supplémentaire

28. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники : в 2 т. : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. школа, 1978. Т.1. – 528 с. ; Т.2. – 232 с.
29. **Брускин Д. З.** Электрические машины : в 2 т. : учебник / Д. З. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Москва : Высш. школа, 1979. Т. 1. – 288 с. ; Т. 2. – 304 с.
30. **Вешеневский С. Н.** Характеристики электродвигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – Москва : Энергия, 1977. – 432 с.
31. **Воробьев А. Д.** Справочник электромеханика по лифтам / А. Д. Воробьев, В. Л. Сегал. – Москва : Моск. рабочий, 1980. – 208 с.
32. **Гоков А. М.** Основы электротехники и электроники. Элементы общей теории электротехники : учеб. пособие / А. М. Гоков, Е. А. Жидко. – Харьков : ХНЕУ, 2006.

33. **Горбачев Г. Н.** Промышленная электроника : учебник / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
34. **Добронравов С. С.** Строительные машины и основы автоматизации : учебник / С. С. Добронравов, В. Г. Дронов. – Москва : Высш. школа, 2001. – 575 с.
35. **Иванов А. А.** Справочник по электротехнике / А. А. Иванов. – Киев : Высш. школа, 1984. – 304 с.
36. **Калашников С. Г.** Электричество : учеб. пособие / С. Г. Калашников. – Москва : Наука, 1985. – 576 с.
37. **Лотоцький К. В.** Електричні машини і основи електропривода : навч. посібник / К. В. Лотоцький. – Київ : Вища школа, 1970. – 475 с.
38. **Нечаев В. В.** Электрические машины : учебник / В. В. Нечаев. – Москва : Высш. школа, 1967. – 219 с.
39. **Панев Б. И.** Электрические измерения : Справочник (в вопросах и ответах) / Б. И. Панев. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 224 с.
40. **Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок.** – Москва : Энергия, 1980. – 158 с.
41. **Правила устройства электроустановок.** – Харьков : Изд-во "Форт", 2009. – 736 с.
42. **Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники** / под ред. П. А. Ионкина. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 768 с.
43. **Сборник задач по теоретическим основам электротехники** / под ред. Л. А. Бессонова. – Москва : Высш. школа, 2000. – 528 с.
44. **Усатенко С. Т.** Выполнение электрических схем по ЕСКД : Справочник / С. Т. Усатенко, Т. К. Каченюк, М. В. Терехова. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 325 с.
45. **Хмара Л. А.** Будівельні крани : Конструкції та експлуатація / Л. А. Хмара, М. П. Колісник, О. І. Голученко. – Київ : Техніка, 2001. – 296 с.
46. **Чиликин М. Г.** Общий курс электропривода : учебник / М. Г. Чиликин, А. А. Сандлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
47. **Шебес М. Р.** Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – Москва : Высш. школа, 1990. – 544 с.
48. **Электрические измерения** : учебник / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др. ; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Ленинград : Энергия, 1980. – 392 с.
49. **Электротехника. Терминология** : Справочное пособие : – Вып. 3. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 343 с.
50. **Электротехнический справочник** : в 3 т. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии / под общ. ред. профессоров МЭИ : И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 661 с.

### 3. Ressources de l'Internet

51. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин [en ligne]. – Disponible sur : <<http://docs.cntd.ru/document/1200023321>>. (Consulté le 18.02.2016).
52. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования [en ligne]. – Disponible sur : <<http://docs.cntd.ru/document/1200004515>>. (Consulté le 18.02.2016).
53. ГОСТ 12.1.013-78 ССБТ. Строительство. Электробезопасность. Общие требования. [en ligne]. – Disponible sur : <<http://docs.cntd.ru/document/5200308>>. (Consulté le 18.02.2016).
54. ДСТУ Б А.3.2-13:2011. Будівництво. Електробезпечність. Загальні вимоги (ГОСТ 12.1.013-78, MOD) [en ligne]. – Disponible sur : <[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=27973](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27973)>. (Consulté le 18.02.2016).
55. **Воропаев Е. Г.** Электротехника: учеб. пособие [en ligne]. Воропаев Е. Г. – Тула, 1999. – 124 с. – Disponible sur : <<http://phys.bspu.by/static/lib/teh/eltehn/vorop1.htm>>. (Consulté le 18.02.2016).
56. **Ильинский Н. Ф.** Основы электропривода: учеб. пособие [en ligne]. Н. Ф. Ильинский / Москва : МЭИ, 2003. – 224 с. – Disponible sur : <[http://2d-elektro.ucoz.ru/downloads/Kurs\\_electroprivoda.pdf](http://2d-elektro.ucoz.ru/downloads/Kurs_electroprivoda.pdf)>. (Consulté le 18.02.2016).
57. **Кулик А. Ю.** Электрические машины [en ligne]. А. Ю. Кулик. – Москва : Высшая школа, 1969. – Disponible sur : <<http://www.razym.ru/tehnickeskaya/elektrotehnika/322845-kulik-yua-elektricheskie-mashiny.html>>. (Consulté le 18.02.2016).
58. **Матуско В.Н.** Общая электротехника: учеб. пособие [en ligne]. В.Н. Матуско. – Новосибирск, 2003. 138 С. – Disponible sur : <[http://www.studmed.ru/matusko-vn-obshchaya-elektrotehnika-uchebnoe-posobie\\_c3c78328d0b.html](http://www.studmed.ru/matusko-vn-obshchaya-elektrotehnika-uchebnoe-posobie_c3c78328d0b.html)>. (Consulté le 18.02.2016).
59. **Некрасова Н. Р.** Общая электротехника и электроника : Электронный учебник [en ligne]. Н. Р. Некрасова, О. Ю. Коваленко – Саранск, Мордовский ГУ, 2003. – Disponible sur : <<http://window.edu.ru/resource/547/56547>>. (Consulté le 18.02.2016).
60. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Disponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Étalon\\_\(métrologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Étalon_(métrologie))>. (Consulté le 18.02.2016).
61. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Disponible sur : <[https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_von\\_Hefner-Alteneck](https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_von_Hefner-Alteneck)>. (Consulté le 18.02.2016).

62. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://fr.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)>. (Consulté le 18.02.2016).
63. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Moritz\\_von\\_Jacobi](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moritz_von_Jacobi)>. (Consulté le 18.02.2016).
64. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippolyte\\_Pixii](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Pixii)>. (Consulté le 18.02.2016).
65. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Emil\\_Lenz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Emil_Lenz)>. (Consulté le 18.02.2016).
66. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Werner\\_von\\_Siemens](https://fr.wikipedia.org/wiki/Werner_von_Siemens)>. (Consulté le 18.02.2016).
67. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Zénobe\\_Gramme](https://fr.wikipedia.org/wiki/Zénobe_Gramme)>. (Consulté le 18.02.2016).
68. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pavel\\_Iablotchkov](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pavel_Iablotchkov)>. (Consulté le 18.02.2016).
69. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mikha%C3%AFl\\_Dolivo-Dobrovolski](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mikha%C3%AFl_Dolivo-Dobrovolski)>. (Consulté le 18.02.2016).
70. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Lenz-Faraday](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz-Faraday)>. (Consulté le 18.02.2016).
71. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Biot\\_et\\_Savart](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Biot_et_Savart)>. (Consulté le 18.02.2016).
72. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <<http://www.ina.fr/video/VDD11021513/>>. (Consulté le 18.02.2016).
73. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Règle\\_de\\_la\\_main\\_gauche](https://fr.wikipedia.org/wiki/Règle_de_la_main_gauche)>. (Consulté le 18.02.2016).
74. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Contact\\_ohmique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Contact_ohmique)>. (Consulté le 18.02.2016).
75. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://en.wikipedia.org/wiki/Nikolay\\_Benardos](https://en.wikipedia.org/wiki/Nikolay_Benardos)>. (Consulté le 18.02.2016).
76. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://en.wikipedia.org/wiki/Nikolay\\_Slavyanov](https://en.wikipedia.org/wiki/Nikolay_Slavyanov)>. (Consulté le 18.02.2016).
77. Site «WikipédiA» [en ligne]. – Diponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Four\\_à\\_réverbère](https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_à_réverbère)>. (Consulté le 18.02.2016).

## ANNEXES

### Annexe 1

#### Alphabet grec

Numéro de séquence	Lettre	Prononciation	Numéro de séquence	Lettre	Prononciation
1	A, α	alpha	13	N, ν	nu
2	B, β	béta	14	Ξ, ξ	xsi
3	Γ, γ	gamma	15	O, ο	omicron
4	Δ, δ	delta	16	Π, π	pi
5	E, ε	epsilon	17	P, ρ	ro
6	Z, ζ	dzéta	18	Σ, σ	sigma
7	H, η	êta	19	T, τ	tau
8	Θ, θ	thêta	20	Υ, υ	upsilon
9	I, ι	iota	21	Φ, φ	phi
10	K, κ	kappa	22	X, χ	khi
11	Λ, λ	lambda	23	Ψ, ψ	psi
12	M, μ	mu	24	Ω, ω	omega

#### Alphabet latin

Numéro de séquence	Lettre	Numéro de séquence	Lettre
1	A, α	14	N, n
2	B, b	15	O, o
3	C, c	16	P, p
4	D, d	17	Q, q
5	E, e	18	R, r
6	F, f	19	S, s
7	G, g	20	T, t
8	H, h	21	U, u
9	I, i	22	V, v
10	J, j	23	W, w
11	K, k	24	X, x
12	L, l	25	Y, y
13	M, m	26	Z, z

## Symboles des principales grandeurs électriques et magnétiques

### 2.1 Valeurs principales, désignés par des lettres de l'alphabet latin :

$B$  – induction magnétique.  
 $B, b$  – susceptance.  
 $C$  – capacité.  
 $E, e$  – force électromotrice.  
 $F$  – force magnétomotrice.  
 $f$  – fréquence d'oscillations.  
 $G, g$  – conductance.  
 $I, i$  – courant électrique.  
 $j$  – densité de courant électrique.  
 $L$  – inductance propre.  
 $M$  – inductance mutuelle.  
 $m$  – nombre de phases de systèmes polyphasés.  
 $N$  – nombre de spires.  
 $n$  – rapport de transformation.  
 $P$  – puissance active.  
 $p$  – nombre de paires de pôles.  
 $Q$  – puissance réactive.  
 $R, r$  – résistance électrique active.  
 $S$  – puissance apparente.  
 $T$  – période d'oscillation.  
 $U, u$  – tension.  
 $W$  – énergie électromagnétique.  
 $w$  – nombre de spires.  
 $X, x$  – résistance réactive.  
 $Y, y$  – admittance.  
 $Z, z$  – impédance.

### 2.2 Valeurs principales, désignés par des lettres de l'alphabet grec :

$\gamma$  – conductivité électrique spécifique.  
 $\epsilon$  – constante diélectrique ( $\epsilon_0$  – constante diélectrique).  
 $\mu$  – perméabilité magnétique ( $\mu_0$  – constante magnétique).  
 $\rho$  – résistance électrique spécifique.  
 $\Phi$  – flux magnétique.  
 $\phi$  – potentiel électrique, décalage de phase entre le courant et la tension.  
 $\psi$  – flux embrassé.  
 $\Omega, \omega$  – fréquence circulaire, fréquence d'oscillations.

Une valeur électrique constante et une valeur efficace d'une variable sont indiqués par une lettre majuscule ; une valeur instantanée d'une variable est indiquée par une lettre minuscule. L'amplitude d'une variable sinusoïdale est indiquée comme une valeur efficace avec l'indice m. Par exemple :

$I, U, E$  – courant, tension, f.é.m. continu ; la valeur efficace d'un courant, d'une tension, d'une f.é.m. alternative ;



$i, u, e$  – la valeur instantanée du courant, de la tension, de la. sinusoïdale.  
 $I_m, U_m, E_m$  – l'amplitude d'un courant, d'une tension, d'une f.é.m sinusoïdale.

2.3 Les grandeurs complexes sont marqués comme suit

$$\begin{aligned}\underline{A} &= A' + jA''; \\ \underline{A} &= \operatorname{Re} \underline{A} + j\operatorname{Im} \underline{A}; \\ \underline{A} &= A e^{j\alpha}; \\ \underline{A} &= |\underline{A}| e^{j\varepsilon}; \\ \underline{A} &= \cos\alpha + jsin\alpha,\end{aligned}$$

où :

$\underline{A}$  – un nombre complexe ;  
 $A' = \operatorname{Re} \underline{A}$  – la partie réelle d'un nombre complexe ;  
 $A'' = \operatorname{Im} \underline{A}$  – la partie imaginaire d'un nombre complexe ;  
 $A = |\underline{A}|$  – module d'un nombre complexe ;  
 $\alpha$  – argument d'un nombre complexe.

Lorsqu'on se réfère aux grandeurs électriques complexes on utilise les symboles adoptés pour ces quantités, par exemple :

$$\underline{S} = P + jQ,$$

où :

$\underline{S}$  – puissance apparente complexe ;  
 $P$  – puissance active ;  
 $Q$  – puissance réactive.

Pour désigner les valeurs complexes, qui sont les fonctions sinusoïdales du temps, on applique au-dessus de leur symboles un point. Par exemple :

$$\begin{aligned}\dot{I} &= I e^{j\alpha}; \\ \dot{U} &= U \cos\alpha + jU \sin\alpha; \\ \dot{\Phi} &= \Phi' + j\Phi''.\end{aligned}$$

Une valeur complexe réduite est indiquée par un astérisque sur le dessus :

$$\begin{aligned}\underline{A}^* &= A' - jA''; \\ \underline{A}^* &= \operatorname{Re} \underline{A} - j\operatorname{Im} \underline{A}; \\ \underline{A}^* &= A e^{-j\alpha}; \\ \underline{A}^* &= |\underline{A}| e^{-j\varepsilon}; \\ \underline{A}^* &= \cos\alpha - jsin\alpha.\end{aligned}$$

Pour désigner les vecteurs du courant, de la tension, de la f.é.m et d'autres valeurs on applique au-dessus de leur symboles de la valeur de vecteur un petit trait :

$\bar{I}, \bar{U}, \bar{E}$ , etc.

## Les unités du système International (SI)

Grandeur physique	Unités			
	Nom de l'unité	Unité de mesure	Symbole	
			russe	international
Grandeurs physiques de base				
Longueur	mètre	$m$	$\mathcal{M}$	$m$
Masse	kilogramme	$kg$	$\kappa\mathcal{Z}$	$kg$
Temps	seconde	$s$	$\mathcal{C}$	$s$
Courant électrique	ampère	$A$	$A$	$A$
Température	kelvin	$K$	$K$	$K$
Intensité lumineuse	candela	$cd$	$\kappa\mathcal{D}$	cd
Unités dérivées des grandeurs électriques				
Densité de courant électrique	ampère par mètre carré	$A/m^2$	$A/\mathcal{M}^2$	$A/m^2$
Charge électrique, quantité d'électricit	coulomb	$A \cdot s$	$\kappa\mathcal{L}$	C
Potentiel électrique, tension, force électromotrice	volte	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s}$	$B$	V
Capacité électrique	farad	$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = \frac{s}{\Omega}$	$\Phi$	$F$
Résistance électrique	ohm	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \frac{V}{A}$	$O\mathcal{M}$	$\Omega$
Résistance électrique spéci- fique	ohm par mètre	$\frac{kg \cdot m^3}{A^2 \cdot s^3} = \Omega \cdot m$	$O\mathcal{M} \cdot \mathcal{M}$	$\Omega \cdot m$
Conductance électrique	siemens		$C\mathcal{M}$	$S$
Unités dérivées des grandeurs magnétiques				
Flux d'induction magnétiqu	weber	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$	$B\mathcal{O}$	$Wb$
Induction magnétique	tesla	$\frac{kg}{A \cdot s^2}$	$T\mathcal{L}$	$T$
Intensité du champ magnétique	ampèr par mètre	$\frac{A}{\mathcal{M}}$	$\frac{A}{\mathcal{M}}$	$\frac{A}{m}$
Inductance	henry	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} = \Omega \cdot s$	$\Gamma\mathcal{H}$	$H$
Perméabilité magnétique	henry par mètre	$\frac{H}{m}$	$\frac{\Gamma\mathcal{H}}{\mathcal{M}}$	$\frac{H}{m}$
Force magnétomotrice	ampèr	$A$	$A$	$A$
Énergie, travail	joule	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	$\mathcal{D}\mathcal{J}$	$J$
Puissance active	watt	$B A \cdot$	$B\mathcal{M}$	$W$
Puissance reactive	var	$B A$	$\mathcal{V}ap$	$var$
Puissance apparente	volte-ampèr	$B A$	$B A$	$VA$

## Les préfixes du SI

Facteur	Préfixe	Symbole		Désignation
		russe	international	
$10^{18}$	exa	Э	E	trillion
$10^{15}$	péta	П	P	billiard
$10^{12}$	téra	T	T	billion
$10^9$	giga	Г	G	milliard
$10^6$	mega	M	M	million
$10^3$	kilo	к	k	millier
$10^2$	hecto	г	h	centaine
$10^1$	déca	да	da	dizaine
$10^{-1}$	déci	д	d	dixième
$10^{-2}$	centi	с	c	centième
$10^{-3}$	milli	м	m	millième
$10^{-6}$	micro	МК	μ	millionième
$10^{-9}$	nano	н	n	milliardième
$10^{-12}$	pico	п	p	billionième
$10^{-15}$	femto	ф	f	billiardième
$10^{-18}$	atto	а	a	trillionième

## Charge de courant sur le fil lors du soudage

Section des fils, mm <sup>2</sup>	Charge maximale admissible sur le fil de soudage, A			
	monocâble		bicâble	
	permanent	cadencé	permanent	cadencé
Température de l'air -5°C				
10	119	165	198	275
16	158	220	251	248
25	211	293	330	460
35	251	349	396	550
50	310	431	489	679
70	383	533	620	863
95	467	650	-	-
120	546	760	-	-
Température de l'air +25°C				
10	90	125	150	208
16	120	167	190	264
25	160	222	250	348
35	190	264	300	416
50	235	327	370	514
70	290	404	470	654
95	354	492	-	-
120	414	575	-	-
Température de l'air +30°C				
10	71	99	118	164
16	95	132	150	203
25	126	175	197	275
35	160	208	237	320
50	186	258	292	405
70	229	319	371	515
95	280	382	-	-
120	327	458	-	-

*Remarque.* Lors de la charge cadencé le temps de soudage n'est pas plus de 4 minutes, la durée totale d'un cycle – 10 min.

Électromoteurs à courant continu, mode permanent, du type ПН, 220 V,  
protégé avec contrôle de vitesse jusqu'à 1:2

Type	$P_{\text{nom}}$ , kW	$N_{\text{nom}}$ , tr/min	$I_{\text{ancr. nom}}$ , A	Nombre de conducteurs actifs de l'ancr. N	Nombre de branches parallèles de l'ancr	Nombre de paires de pôles, 2p	Résistance			Spire sur un pôle		Courant nominale d'enroulement dérivé, A	Flux nominal du pôle $\Phi$ , mWb	Moment d'inertie d'ancr $J$ , kg m <sup>2</sup>	Masse du moteur, kg
							Ancr+ pôles auxiliaires, $R_{\text{ancr}} + R_{\text{aux}}$ , $\Omega$	Enroulement stabilisateur $R_{\text{suc}}$ , $\Omega$	Enroulement dérivé, $R_{\text{dériv}}$ , $\Omega$	Enroulement stabilisateur, $w_{\text{suc}}$	Enroulement dérivé, $w_{\text{dériv}}$				
ПН-45	2,5	1000-1950	14,1	1218	2	4	1,37	0,11	372	12	2400	0,48	4,8	0,07	107
	4,4	1500-2100	23,5	812	2	4	0,6	0,043	298	9	2300	0,6	5,0	0,07	107
	6,6	2200- 2400	35,0	522	2	4	0,26	0,043	298	9	2300	0,6	5,4	0,07	107
ПН-68	3,7	1000- 1750	21,0	1116	2	4	0,89	0,05	250	11	2200	0,71	5,2	0,125	135
	6,5	1550- 2000	35,0	744	2	4	0,364	0,012	250	6	2200	0,71	5,2	0,125	135
	10,0	2250- 2400	52,2	496	2	4	0,17	0,012	188	6	1900	0,95	5,6	0,125	135
ПН-85	5,6	1000-1750	30,0	744	2	4	0,48	0,04	228	8	1750	0,78	8,1	0,16	175
	9,0	1500- 2000	48,0	496	2	4	0,22	0,02	228	6	1750	0,78	8,3	0,16	175
ПН-100	5,8	780- 1500	34,0	1112	2	4	0,62	0,013	136	6	1800	1,3	7,0	0,4	290
	10,0	1090- 1900	55,0	834	2	4	0,33	0,009	136	6	1800	1,3	6,6	0,4	290
	15,0	1560- 2000	81,5	556	2	4	0,143	0,004	96	4	1500	1,8	7,1	0,4	175
ПН-145	8,5	780- 1500	46,5	834	2	4	0,36	0,014	166	8	1700	1,1	9,3	0,5	330
	13,5	1050- 1500	73,0	556	2	4	0,12	0,006	150	4	1700	1,2	10,5	0,5	330
	21,0	1500- 1900	110	420	2	4	0,09	0,004	150	4	1700	1,2	9,7	0,5	330
ПН-205	14,0	750- 1500	76	700	2	4	0,22	0,01	92	8	1500	1,9	11,5	1,0	480
	20,5	970- 1700	110	556	2	4	0,08	0,006	92	6	1500	1,9	11,4	1,0	480
	33,5	1580- 1900	174	350	2	4	0,054	0,002	92	3	1500	1,9	11,2	1,0	480
ПН-290	19,0	750- 1300	102	524	2	4	0,122	0,007	86	6	1400	2,1	15,6	1,2	530
	29,0	1000- 1600	151	396	2	4	0,070	0,002	57	3	1250	3,1	15,5	1,2	530
	46,5	1500- 1800	238	278	2	4	0,035	0,002	59	3	1250	3,0	15,0	1,2	530

# Annexe 7

Moteurs asynchrones de grue à rotor robiné des types MT et MTB, 380 V, 50 Hz, FM = 25%  
(classe d'isolation E, B)

Type	$P_{\text{nom}}$ , kW	$N_{\text{nom}}$ , tr/min	$M_{\text{max}}/M_{\text{nom}}$	Stator						Rotor					Moment d'inertie du rotor $J$ , kg m <sup>2</sup>	Masse du moteur, kg
				cosφ		$I_{\text{stator, nom}}$ , A	$I_{\text{stator, à vide}}$ , A	$R_{\text{stator}}$ , Ω	$X_{\text{stator}}$ , Ω	$E_{\text{rotor}}$ , V	$I_{\text{rotor, nom}}$ , A	$R_{\text{rotor}}$ , Ω	$X_{\text{rotor}}$ , Ω	Rapport de transformation de la tension		
				nominale	à vide											
MT011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	3,14	0,0212	51
MT012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11,0	0,67	0,58	2,5	0,0288	58
MT111-6	3,5	915	2,3	0,70	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	1,96	0,0488	76
MT112-6	5,0	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,50	0,43	1,72	0,0675	88
MT211-6	7,5	935	2,5	0,70	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
MTB311-6	11,0	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,57	172	42,5	0,11	0,225	2,1	0,225	170
MTB311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21,0	14,0	0,88	0,965	251	20,5	0,47	0,72	1,41	0,275	210
MTB312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41	208	49,5	0,0099	0,25	1,75	0,313	210
MTB312-8	11	710	2,8	0,66	0,10	33,0	22,1	0,53	0,56	182	41,0	0,13	0,23	1,96	0,387	210
MTB411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55,0	33,2	0,19	0,31	225	61,0	0,066	0,23	1,6	0,5	280
MTB411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43	207	49,5	0,103	0,25	1,73	0,538	280
MTB412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42,0	0,125	0,23	259	72,0	0,055	0,225	1,4	0,675	345
MTB412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32	234	59,0	0,09	0,24	1,53	0,75	345
MTB511-6	30	720	2,8	0,68	0,06	77,0	46,0	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
MTB512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500

## Annexe 8

Moteurs asynchrones de grue à cage d'écureuil des types MTK et MTKB, 380 V, 50 Hz, FM = 25%  
(classe d'isolation E, B)

Type	$P_{\text{nom}}$ , kW	$N_{\text{nom}}$ , tr/min	$M_{\text{max}}/M_{\text{nom}}$	$M_{\text{m.m.}}/M_{\text{nom}}$	Stator							
					$I_{\text{cu}}/I_{\text{cu}}$	$\cos\varphi$			$I_{\text{stator.nom}}$ , A	$I_{\text{stator.à vide}}$ , A	$R_{\text{stator}}$ , $\Omega$	$X_{\text{stator}}$ , $\Omega$
						mise en marche	nominale	à vide				
MTK011-6	1,4	870	2,8	2,8	3,0	0,86	0,69	0,15	4,8	3,2	5,98	3,93
MTK012-6	2,2	875	2,8	2,8	3,1	0,85	0,7	0,13	7,2	4,6	3,6	2,58
MTK111-6	3,5	870	2,8	2,8	3,5	0,85	0,74	0,11	10,1	6,1	2,16	2,03
MTK112-6	5,0	890	3,0	3,0	3,9	0,80	0,75	0,12	13,5	8,4	1,32	1,39
MTK211-6	7,5	905	2,9	2,8	4,3	0,72	0,79	0,09	18,4	11,0	0,68	1,07
MTKB311-6	11,0	910	3,1	2,8	4,9	0,72	0,8	0,09	26	15,7	0,54	0,575
MTKB311-8	7,5	680	3,1	2,9	4,4	0,76	0,74	0,09	20	13,2	0,88	0,965
MTKB312-6	16	905	3,1	2,8	4,9	0,70	0,79	0,08	37,8	19,8	0,33	0,41
MTKB312-8	11	690	3,1	3,1	4,6	0,77	0,71	0,10	30,4	21,3	0,53	0,56
MTKB411-6	22	935	3,0	2,8	5,2	0,61	0,78	0,07	50	29,7	0,19	0,31
MTKB411-8	16	695	3,3	3,0	4,8	0,66	0,73	0,08	41	28,2	0,285	0,43
MTKB412-6	28	945	3,3	2,8	5,6	0,60	0,81	0,06	62	35,1	0,125	0,23
MTKB412-8	22	695	3,3	3,0	5,0	0,65	0,76	0,07	53,2	35,8	0,207	0,32
MTK511-6	28	700	3,4	3,1	5,4	0,61	0,75	0,06	68	40	0,123	0,245
MTKB512-8	37	705	3,6	3,3	5,8	0,61	0,72	0,06	91	55	0,08	0,17

## Paramètres techniques des moteurs synchrones

Type	$U_{\text{nom}}$ , kV	$S_{\text{nom}}$ , kVA	$P_{\text{nom}}$ , kW	$N_{\text{synchrones}}$ , tr/min	$\cos\varphi_{\text{nom}}$ , (avancé)	$I_{\text{stator.nom}}$ , A	$I_{\text{rotor.nom}}$ à $\cos\varphi_H$ , A	$I_{\text{rotor.nom.à vide}}$ , A	$M_{\text{max}}/M_{\text{nom}}$
ДC3-2121-16	10	17000	14070	375	0,85	983	561	350	2,1
MC325-12/12	10	7000	5400	500	0,8	404	367	212	2,4
MC325-12/12	6	8000	6150	500	0,8	770	408	211	1,85
MC321-7/6	6	900	675	1000	0,8	86,5	278	139	2,0
MC323-14/8	3	3850	3300	750	0,9	740	466	295	2,25
MC321-6/6	3	850	640	1000	0,8	164	164	190	2,25

## Poursuite de l'annexe 9

Type	Démarrage en asynchrone				Moment d'inertie du rotor $J$ , t m <sup>2</sup>	Masse du moteur, t	Nombre de spires		Coefficient de bobinage du stator, $k_{\text{bobinage}}$	Pas polaire $\tau$ , mm
	$I_{\text{m.m.}}/I_{\text{nom}}$	$M_{\text{n.m.}}/M_{\text{nom}}$	$M_{\text{entr.}}/M_{\text{nom}}$	$\cos\varphi_H$			d'une phase du stator	d'un pôle du rotor		
ДC3-2121-16	6,1	0,545	1,88	0,1	50	110	72	44,5	0,945	536
MC325-12/12	6,5	0,65	1,1	0,149	12,7	54	126	54,5	0,89	607
MC325-12/12	5,8	0,7	1,29	0,151	15,7	56	72	54,5	0,918	607
MC321-7/6	5,5	1	0,8	0,281	0,135	5,7	216	49,5	0,945	420
MC323-14/8	6	0,8	0,8	0,196	1,32	14	45	45,5	0,945	500
MC321-6/6	4,6	0,8	0,65	0,28	0,12	5,2	135	43,5	0,88	420



*Навчальне видання*

**АЧКАСОВ** Анатолій Єгорович,  
**ЛУШКІН** Володимир Андрійович,  
**ОХРІМЕНКО** Вячеслав Миколайович,  
**ВОРОНКОВА** Тетяна Борисівна

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА У БУДІВНИЦТВІ**

**ПІДРУЧНИК**  
(Фр. мовою)

Відповідальний за випуск *В. М. Охріменко*

Редактор *В. М. Охріменко*

Комп'ютерний набір *В. М. Охріменка*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарової*

Дизайн-обкладинки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 09.11.2016 р.	Формат 60х84/16
Друк на ризографі	Ум. друк. арк. 23,8
Зам. №	Тираж 300 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017 р.